



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Aplikace fuzzy metod řízení pro regulaci teploty přehřáté páry

## Autoreferát disertační práce

*Studijní program:* P2612 – Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* 2612V045 Technická kybernetika

*Autor práce:* **Ing. Tomáš Náhlovský**  
*Vedoucí práce:* Doc. Ing. Osvald Modrlák, CSc.



---

## Anotace

Předkládaná disertační práce se zabývá aplikací fuzzy metod pro regulaci teploty přehřáté páry vysokotlaké části elektrárenského bloku průtočného kotle. Nejprve je popsána technologie a proveden krátký přehled publikovaných postupů v oblasti aplikace fuzzy regulace v procesu přehřívání páry. Následně jsou specifikovány cíle práce i důvody jejich volby.

Těžiště práce je rozprostřeno na výzkum v několika oblastech. Základem byla analýza jednotlivých metod implementace fuzzy řízení daného technologického procesu. Další oblastí byla transformace výchozího nelineárního modelu do množiny lokálně lineárních modelů pro potřeby optimalizace parametrů fuzzy regulátoru. Tato optimalizace byla založena na minimalizačních kritériích. Jedním z významných výstupů je i podrobná metodika aplikace citlivosti parametrů fuzzy regulátoru při návrhu regulace teploty. Analýza vlivu jednotlivých parametrů fuzzy regulátorů umožnila snížení jejich počtu v optimalizační úloze. Výsledky fuzzy regulace lze automaticky hodnotit pomocí Fuzzy Pattern klasifikace.

Uvedené metody jsou vhodným základem pro analýzu možností fuzzy řídicího systému pro regulaci teploty přehřáté páry. Výhodou může být snadná implementace regulátoru na reálném zařízení v podobě tabulky.

Vlastnosti navržené fuzzy regulace jsou ověřeny simulačními experimenty jak pro běžné operační režimy, tak i na poruchy a změnu dynamiky soustavy. Regulační pochody ze systému fuzzy regulace jsou porovnány s regulačními průběhy z původního PI řídicího systému a vykazují výrazné zlepšení odezev systému.

**Klíčová slova:** fuzzy regulace, optimalizace parametrů, přehřívání páry

---

## Annotation

The thesis is concerned with fuzzy control method application of superheated steam temperature of high pressure part in once-through boiler in the power plant. At first the technology is described, after that a short summary of published methods in fuzzy control application of superheated steam process is made. Subsequently the main goals and reasons of their choice are specified.

The main focus of the thesis is divided into several areas. It is based on individual methods analysis of fuzzy control implementation in the technological process. Other area is transformation of default non-linear model to a set of local linear models for optimization of fuzzy controller parameters. This optimization was based on minimization criteria. One of the remarkable results is detailed methodology application of sensitivity fuzzy controller parameters for temperature control design. Analysis of fuzzy controller parameters effect allowed reduction their number in optimization problem. The fuzzy control results can be automatically evaluated using the Fuzzy Pattern classification.

These methods are appropriate basis for analyzing the possibility of a fuzzy control system for superheated steam temperature control. The advantage may be a simple implementation of the controller, in table form, on a real device.

Fuzzy control properties are verified by simulation experiments for operating mode, response to disturbance and change of the system dynamics. The response of fuzzy control and original PI control system response are compared. The fuzzy control results dramatically improve system responses.

**Keywords:** fuzzy control, parameters optimization, superheated steam

---

# Obsah

1	Úvod .....	6
2	Současný stav problematiky .....	8
2.1	Popis technologického celku výroby páry v průtočném kotli, prvky regulované soustavy.....	8
2.2	Současný řídicí systém .....	8
2.3	Aplikace fuzzy řízení v procesu přehřívání páry .....	9
3	Cíle práce a metody řešení.....	12
3.1	Požadavky kladené na regulaci přehřáté páry .....	12
3.2	Formulace cílů práce .....	12
4	Metody a prostředky fuzzy řízení .....	14
4.1	Náhrada PI regulátoru za fuzzy PI regulátor .....	14
4.2	Faktory ovlivňující kvalitu fuzzy regulace .....	16
5	Modelování technologického procesu vyvíječe páry .....	17
5.1	Nelineární model procesu výroby páry .....	17
5.2	Síť lokálně lineárních modelů pro VT část .....	17
6	Optimalizace parametrů fuzzy PI regulátorů .....	21
6.1	Formulace optimalizační úlohy.....	21
6.2	Strategie optimalizace – pracovní hypotézy .....	21
6.3	Optimalizace založená na maximálním využití vstupních intervalů.....	22
6.4	Optimalizace založená na minimalizačním kritériu .....	22
6.4.1	Postupná optimalizace dle struktury technologie .....	23
6.4.2	Optimalizace parametrů podle teploty na výstupním přehříváku VP .....	25
6.4.3	Ověření výsledků optimalizace na trendovou změnu výkonu na linearizovaném modelu a ověření na nelineárním modelu.....	26
6.5	Klasifikace výsledků – Fuzzy Pattern klasifikace.....	28
6.5.1	Popis klasifikační metody .....	28
6.5.2	Analýza parametrů fuzzy PI regulátoru a souvislost s výsledky Fuzzy Pattern klasifikace .....	28
7	Simulační experimenty .....	34
7.1	Verifikační experimenty operačních režimů na nelineárním modelu .....	34
7.1.1	Reakce na skokovou změnu tepelného výkonu ze 100 % na 50 % .....	34
7.1.2	Reakce na trendovou změnu výkonové hladiny 50 % – 100 % – 50 % ...	35
7.2	Ověření vlastností chování při změně dynamiky soustavy .....	35
7.3	Ověření vlastností chování soustavy při poruše na spalínách .....	36

---

7.4	Možnosti implementace fuzzy regulace .....	37
8	Shrnutí výsledků, přínos práce .....	39
8.1	Shrnutí výsledků.....	39
8.2	Přínos práce .....	41
9	Závěr .....	42
	Citovaná literatura.....	43
	Vlastní publikace .....	46

---

# 1 Úvod

V dnešní době je věnována velká pozornost životnímu prostředí. Energetika významným způsobem zasahuje do životního prostředí, a proto má vysokou prioritu snaha o zefektivnění výroby elektrické energie. V současnosti se vytváří nová energetická koncepce, která se z hlediska zdrojů elektrické energie opírá o jaderné elektrárny, obnovitelné energetické zdroje, dále ve výhledu 10-15 let ještě o stávající tepelné elektrárny a o rekonstrukci vybraných uhelných elektráren. Při rekonstrukci uhelných elektráren je kromě jiného kladen požadavek na zvýšení účinnosti a potlačení negativních ekologických dopadů uhelných energetických bloků pracujících s přehřátou vodní parou. Jedna z možností, jak dosáhnout vyšší účinnosti, je návrh nových řídicích algoritmů technologického celku přehřevu a přehřevu páry. Jedná se o problematiku rozsáhlých systémů s více vstupy a výstupy (MIMO).

Úkol řízení a regulace technologie výroby elektrické energie v tepelných elektrárnách spočívá v regulaci jednotlivých technologických uzlů [1], [2].

1. Regulace a řízení parametrů průtoku vody a páry
2. Regulace průtoku paliva primárního a sekundárního vzduchu
3. Regulace spalovacích procesů a obsahu škodlivých prvků
4. Regulace teploty přehřáté páry a ekonomizérů

Složitost elektrárenských systémů výroby a distribuce elektrické energie se v průběhu času zvyšuje. A to příchodem nových technologií, zvýšením výkonnosti a vyšších požadavků na bezpečnost a spolehlivost. Cílem je zpracovávat běžné poruchy a udržení klíčových parametrů na optimálních hodnotách. **Použitý systém řízení v současné době využívá adaptivní PI(D) regulátory v kaskádní regulaci, jejichž proces adaptace je založen na vhodném výběru parametrů z báze znalostí a zkušeností.** Avšak ani tyto regulátory se nedokážou plně vyrovnat s novými požadavky na kvalitu regulace, protože požadavky kladené na růst účinnosti nutí výrobce pracovat s parametry páry blízké kritickým hodnotám, pro které adaptivní regulační systém PI(D)

---

regulátorů<sup>1</sup> nemá vytvořenou vhodnou databázi parametrů. Kromě toho se požaduje, aby vstřík kondensátu byl minimální a ještě dále nesnižoval účinnost.

Těžištěm výzkumných snah je tedy nalezení jiných sofistikovaných regulačních algoritmů [V1], jako jsou metody „Model prediktivního řízení (MPC)“ [3], [4] a [5], „robustní řízení“ [6] a [7], nebo uvažovat o implementaci fuzzy řízení. Je možno očekávat, že se uplatní pouze ty sofistikované regulační algoritmy, které při regulaci procesu přehřáté páry na průtočném kotli zajistí kvalitnější regulační pochody ve srovnání s původním PI řídicím systémem v kaskádní struktuře.

Má disertační práce se zabývá možnostmi implementace fuzzy přístupů a metod pro regulaci procesu přehřáté páry v průtočném kotli [V2]. Využívá nelineárních vlastností fuzzy regulátorů, řeší a navrhuje metodiku optimalizace parametrů fuzzy regulátorů v kaskádní regulaci procesu přehřívání páry vysokotlaké části pro oblast celého výkonového rozsahu. Takto nalezená množina fuzzy regulátorů významně zjednoduší implementaci algoritmů řízení. Optimalizace parametrů fuzzy regulátorů s nelineárním modelem je časově náročná, proto se využívá pro odhad optimálních parametrů množiny lokálně linearizovaných modelů procesu v celém pracovním rozsahu.

I přes velký rozvoj metod sofistikovaného řízení se zatím nepodařilo tyto metody na českém území v běžném provozu implementovat. Kromě hledání vhodných modelů [8] a identifikačních metod [9], které umožní syntézu těchto algoritmů, je třeba hledat i vhodné hardwarové a softwarové prostředky pro praktické implementace. Nové požadavky na zvyšování účinnosti a tlak na ochranu životního prostředí však nyní vytvářejí reálné předpoklady pro implementace pokročilých algoritmů řízení v energetice.

Ústav MTI je v rámci výzkumného centra nositelem projektu Technologické agentury České republiky číslo TA0202109 „Prediktivní řídicí systém pro zlepšení stability a zvýšení účinnosti elektrárenských bloků“, který navazuje na projekt výzkumného centra MŠMT 1M06059 „Progresivní systémy a technologie pro energetiku“. Disertační práce jsem vypracoval v rámci těchto projektů.

---

<sup>1</sup> Dále v práci již označován jako původní PI řídicí systém.

---

## 2 Současný stav problematiky

### 2.1 Popis technologického celku výroby páry v průtočném kotli, prvky regulované soustavy

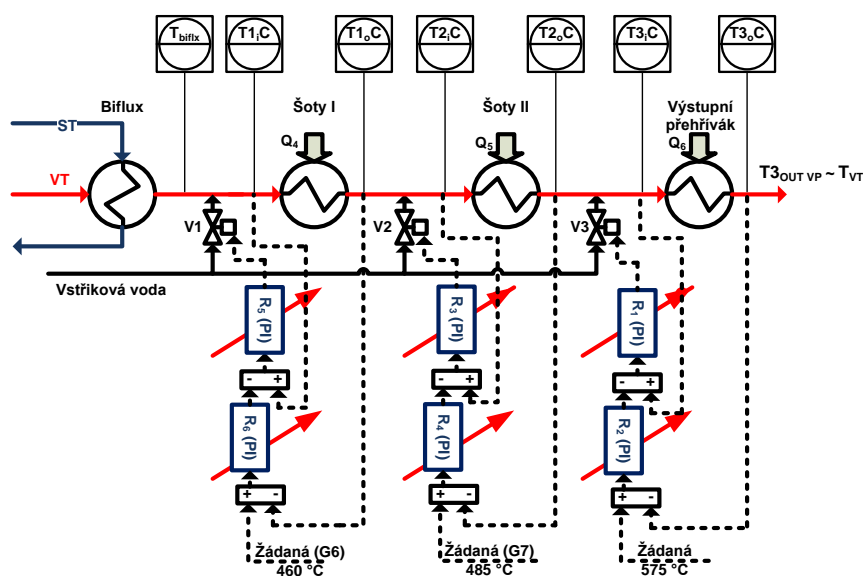
Disertační práce je zaměřena na vývoj fuzzy algoritmu řízení pro část provozu Elektrárny Pruněrov II (EPR), která právě prochází rekonstrukcí. Pracovní oblast průtočného kotle je dána rozsahem výkonové hladiny od 50 % do 100 %, tedy v rozsahu, kdy je vyráběna elektrická energie. Hladina 50 % tedy odpovídá 0 % jmenovitého elektrického výkonu (250 MW). Výkonová hladina vyjadřuje aktuální tepelný výkon v procentech jmenovitého tepelného výkonu. Samotný kotel lze z technologického hlediska chápat jako sestavu několika tepelných výměníků, ve kterých probíhá postupně proces ohřevu vody, výroby páry, jejího přehřívání a přehřívání. Struktura technologického celku vyvíjení páry je složena ze dvou větví (ST - středotlaká a VT – vysokotlaká), pro které je společný protiproudý tepelný výměník pára-pára (biflux), který zajišťuje energetickou výměnu mezi VT a ST párou. Větev technologického celku přehřívání páry (VT) je složena z částí ekonomizér, výparník, přechodníkem, první a druhý přehřívák jsou z našeho pohledu považovány za neregulované tepelné výměníky z hlediska absence vstříků. Dále je včleněn biflux, který lze na VT páře řadit stále k neregulované části. Poté jsou již řazeny přehříváky, jejichž úkolem je dodat páře dostatek energie, protože jen tato energie je posléze využitelná na turbíně. Posledním technologickým úsekem VT části jsou regulované části – přehříváky Šoty I., Šoty II. a Výstupní přehřívák, kde každé z těchto částí je předřazen samostatný vstřík.

### 2.2 Současný řídicí systém

Dynamika teploty páry na výstupu z přehříváků je vysokého řádu a je komplikována přítomností významných nelinearit a dopravního zpoždění. V principu se jedná o řízení vícerozměrového MIMO systému pomocí decentralizovaného řízení. Současný systém řízení přehřívání i přehřívání pracuje s kaskádovou strukturou kvazi-adaptivních PI(D) regulátorů, jejichž vybrané parametry jsou v průběhu provozu pomocí předem definovaných funkcí měněny v daných intervalech v závislosti na výkonu a okamžitých parametrech kotle. Na obr. 2-1 je zjednodušené blokové schéma řídicího obvodu VT části přehřívání páry. Vysokotlaká část přehřívání páry má



z pohledu cílů řízení jeden jasný cíl – udržení teploty výstupní páry za kotlem v co nejužším pásmu při všech možných provozních změnách (vyjma režimů najíždění a odstavování). Neméně důležitá je i odolnost a stabilita této teploty při poruchových stavech. Ve vysokotlaké části pracují tři nezávislé kaskádní struktury PI(D) regulátorů. Každý z těchto úseků sestává z předřazeného vstřikovacího ventilu a přehříváku. Akčními zásahy jsou polohy ventilů  $V1$ ,  $V2$  a  $V3$ , jimiž se mění průtok chladicí vody. Mezi poruchové veličiny patří zejména změna dodávaného tepla, změna průtoku páry, výpadek napaječky, apod. Měřenou poruchou je pouze teplota vstupní páry, ostatní veličiny jsou odvozovány ze znalosti aktuální velikosti výkonové hladiny kotle.



Obr. 2-1: Zjednodušené blokové schéma řídicího obvodu VT části

Pro úplnost jsou v tab. 2 uvedeny souhrnné požadavky na dodržení ustálených hodnot vstupních a výstupních teplot do jednotlivých přehříváků a otevření jednotlivých vstřikovacích ventilů pro definované výkonové hladiny.

## 2.3 Aplikace fuzzy řízení v procesu přehřívání páry

Od první úspěšně aplikované myšlenky fuzzy množin (1965) [10] k regulaci dynamických procesů (kombinace parního motoru a kotle (1974) [11]) se zvyšuje zájem o oblast tzv. „Fuzzy Control System Engineering“, pomocí které je možné účinně a efektivněji regulovat mnoho složitých systémů (zkušenými) lidskými operátory, kteří obecně nemají znalosti o základní dynamice procesu, přičemž je složité dosáhnout kvalitních výsledků konvenčními regulátory. To vedlo k budoucímu vývoji teorie fuzzy

---

regulace v různých aplikacích [12]. Většina z těchto aplikací jsou založeny na intuitivní implementaci zkušeností odborníků. V oblasti regulační byly vyvinuty různé typy fuzzy PID regulátorů pro SISO systémy [13], [14] a [15], které byly úspěšně implementovány. Publikace se zabývají základní filozofií fuzzy regulace, jejich návrhem, základní analytickou strukturou a analýzou jednoduchých fuzzy PI regulátorů. Ve spojení s neuronovými sítěmi byla řešena regulace teploty páry speciálních technologií [16]. Jednou z výchozí literatury pro pochopení problematiky fuzzy regulace přehřáté páry je publikace [17], kde je diskutována možnost přizpůsobení teploty přehřáté páry pro Bensonův průtočný kotel 440 MW, za pomoci zpětnovazební a dopředné fuzzy regulace. Na obr. 2-2 je struktura dopředného zpětnovazebního hybridního fuzzy regulačního systému. Výsledky jsou porovnány s konvenčním kaskádním řídicím systémem a dokáží udržet výstupní teplotu v rozsahu  $535 \pm 2,6$  °C. Pro experimenty je použit matematický model založený na genetických algoritmech. Z této publikace lze dobře vycházet při diskuzi k návrhu vlastní fuzzy regulace pro náš konkrétní případ.

Další literaturou, zabývající se regulací teploty páry v tepelných elektrárnách je článek [18]. Jedná se o implementaci regulátoru založeného na fuzzy logice pro regulaci teploty páry pro 300 MW tepelnou elektrárnu. Cílem je dosáhnout regulace teploty v rozsahu  $\pm 5$  °C. Porovnání výsledků je diskutováno s výsledky prediktivní DMC regulace [3] a klasické konvenční PID regulaci viz obr. 2-3. Je konstatováno, že regulátory s fuzzy logikou dosahují dobrých výsledků pro komplexní nelineární systémy s velkou změnou dynamiky a výrazným benefitem je snížení překmitů regulované teploty. Publikace [19] popisuje charakteristický přístup řešení problémů vícerozměrové regulace, kde zavádí metodu „self-tuning“, při níž dochází k modifikaci koeficientu zesílení na výstupu fuzzy regulátoru. Struktura fuzzy regulátoru s dvěma self-tuning mechanismy je na obr. 2-4. Další publikací, která popisuje návrh fuzzy regulátoru při adaptaci rozmístění funkcí příslušnosti v rámci universa je [20], případně úprava báze pravidel [21]. Publikace [20] se zabývá regulací linearizovaného modelu Bensonova průtočného kotle 1900 t/h, který je aproximován přenosem vyššího řádu.

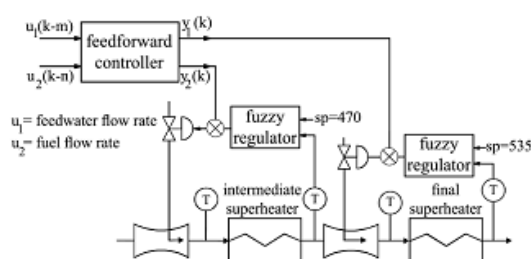
*Celkově je možno konstatovat, že:*

- pro počáteční nastavení se využívá fuzzy PI regulátorů se základními zobecněnými metapravidly,

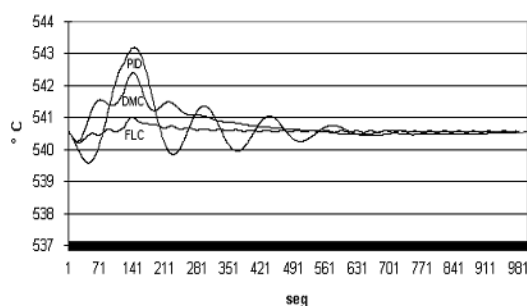
- většina publikací pro zlepšení regulačních průběhů využívá změny zesílení parametrů měřítek universa,
- vstupy pro nastavení parametrů měřítek universa se liší dle daných aplikací,
- většina publikací provádí simulační experimenty na lineárních modelech.

*Na základě simulačních experimentů a požadavků provozovatele jsem se rozhodl, že navrhovaný regulátor bude využívat:*

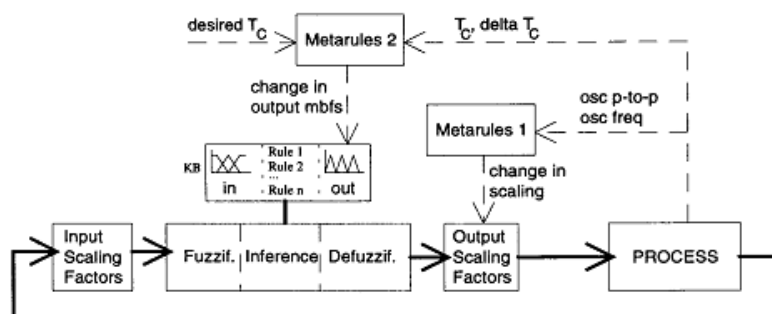
- při hledání parametrů fuzzy regulátoru nelineární model i množinu lokálně lineárních modelů průtočného kotle,
- ověřování výsledků fuzzy regulace na simulačních experimentech na nelineárním modelu průtočného kotle,
- při seřízení parametrů regulátorů budeme využívat výsledků optimalizace změnou parametrů měřítek universa,
- pro přepínání mezi nastavením regulátoru využijeme měřený tepelný výkon systému.



**Obr. 2-2: Dopředný zpětnovazební fuzzy hybridní regulační systém - struktura (převzato z [17])**



**Obr. 2-3: Průběh teploty přehřáté páry - porovnání PID, Fuzzy, DMC (převzato z [18])**



**Obr. 2-4: Struktura fuzzy regulátoru a jeho dva self-tuning mechanismy (převzato z [19])**

---

## 3 Cíle práce a metody řešení

### 3.1 Požadavky kladené na regulaci přehřáté páry

Cílem regulace je udržovat teplotu přehřáté páry za každým přehřívákem konstantní, přičemž nejvýznamnější je teplota přehřáté páry za výstupním přehřívákem, protože tato pára následně vstupuje do vysokotlaké turbíny. Teplota výstupní páry by měla mít teplotu 575 °C s tolerancí  $\pm 2$  °C. Teplotu páry je možné regulovat vstřikováním chladicí vody. Požadavky na regulaci procesu shrneme do několika základních bodů:

- reakce na základní provozní děje (najíždění a sjíždění výkonové hladiny)
- potlačení poruch (měřené, neměřené)
- zaručena stabilita pro celý rozsah
- částečné utlumení regulačních pochodů
- rychlejší dosažení žádané teploty
- tlumené a hladší akční zásahy
- zvýšení životnosti vstřikovacích ventilů a samotných výměníků
- snaha o co nejmenší vstřiky chladicí kapaliny, pro dosažení vyšší účinnosti procesu

### 3.2 Formulace cílů práce

Hlavním cílem této disertační práce je výběr a optimalizace množiny parametrů fuzzy regulátorů v procesu přehřívání páry VT části průtočného kotle elektrárny Prunéřov II. (EPR), jeho modelová implementace a vyhodnocení možných přínosů pokročilých algoritmů a struktur řízení komponent průtočného kotle. Pro návrh a ověření vlastností vyvíjeného systému řízení je použit nelineární stavový model [8] a síť lokálně lineárních modelů [V4]. Pro dosažení uvedených hlavních cílů nebo alespoň jejich částí lze navrhnout následující body:

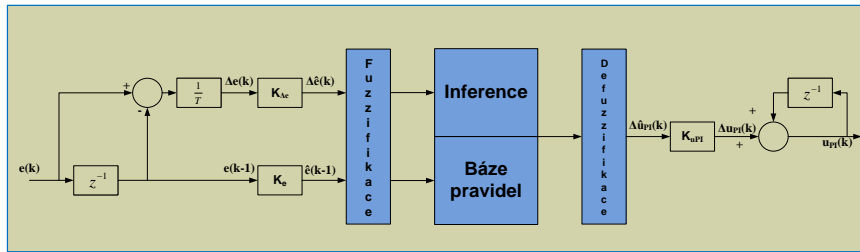
- A. Analýzu a modelování tepelně technických a energetických procesů, především pak vybraných technologických uzlů. Jednotlivé kroky tvoří:

- 
1. Analýza a identifikace jednotlivých technologických uzlů přehřívání páry a provozních jednotek na základě simulačních výpočtů s nelineárním stavovým modelem.
  2. Na základě identifikace definovaných technologických režimů nalezení množiny vhodných lokálně linearizovaných modelů ve tvaru přenosových funkcí.
  3. Pro vybrané technologie navrhnout fuzzy síť lineárně lokálních modelů, na kterých se bude aplikovat syntéza řízení.
- B. Výběr a syntéza vhodných struktur a typů fuzzy regulátorů a jejich optimalizace:
1. Zformulovat pro vybrané výrobní uzly či agregáty požadavky na regulaci  
- ve formě fuzzy logiky.
  2. Navrhnout vhodnou hierarchickou strukturu řízení a regulace, že:  
- stávající struktura kaskádní regulace bude zachována, z důvodu možnosti reakce na poruchy.  
- místo stávající PI regulace s proměnnými parametry PI regulátoru budou parametry regulátoru při definovaných technologických režimech nastavovány pomocí fuzzy logiky.
  3. Optimalizace parametrů fuzzy regulátorů.
  4. Možnosti zjednodušení implementace fuzzy regulátorů na číslicovém řídicím systému.
- C. Ověřování vlastností algoritmů a řídicích struktur pomocí simulačních modelů:
1. Využívání měření a informačních systémů pro volbu modelu i strategie rozhodování.
  2. Ověření a odzkoušení různých metodik výpočtu algoritmů a jednotlivých regulačních principů.
  3. Modelování dynamických vlastností regulačních pochodů s fuzzy logikou a jejich porovnávání s výsledky s původním řídicím systémem.

## 4 Metody a prostředky fuzzy řízení

### 4.1 Náhrada PI regulátoru za fuzzy PI regulátor

První fuzzy logické regulátory implementované Mamdani [11], byly konstruovány na syntéze lingvistických výroků kvalifikované lidské obsluhy. Praxe ukázala, že pro jednoduchý fuzzy regulátor typu PI, PD je možno odvodit bázi pravidel pomocí **tří základních meta-pravidel**. Ve své práci využívám struktury fuzzy PI regulátorů, která je na obrázku obr. 4-1. Výstup konvenčního spojitého PI regulátoru v s-oblasti je dán:



Obr. 4-1: Struktura fuzzy PI regulátoru

$$u_{PI} = (K_p^c + \frac{K_I^c}{s})E(s) \quad (4.1)$$

kde  $K_p^c$  a  $K_I^c$  jsou proporcionální a integrační zesílení spojitého PI regulátoru,  $E(s)$  je Laplaceův obraz pro  $e(t)$ . Rovnice je transformována do diskrétního prostoru aplikací bilineární transformace (4.2)

$$u_{PI}(z) = (K_p^c - \frac{K_I^c T}{2} + \frac{K_I^c T}{1-z^{-1}})E(z) \quad (4.2)$$

Označme:

$$K_p^d = K_p^c - \frac{K_I^c T}{2} \text{ a } K_I^d = K_I^c T \quad (4.3)$$

použitím inverzní  $z$ -transformace a vydělením vzorkovací periodou  $T$  získáme:

$$\Delta u_{PI}(nT) = K_p^d \Delta e(nT) + K_I^d e(nT) \quad (4.4)$$

kde:

$$\Delta u_{PI}(nT) = \frac{u_{PI}(nT) - u_{PI}(nT - T)}{T} \quad (4.5)$$

$$\Delta e(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T} \quad (4.6)$$

přesněji  $\Delta u_{PI}(nT)$  je přírůstek akční veličiny PI regulátoru,  $e(nT)$  je regulační odchylka,  $\Delta e(nT)$  je změna regulační odchylky,  $K_p^d$  a  $K_I^d$  jsou proporcionální a integrační zesílení diskrétního PI regulátoru. Rovnici (4.5) můžeme přepsat do tvaru (4.7) a při návrhu fuzzy PI regulátoru [13] nahradíme term  $T\Delta u_{PI}(nT)$  fuzzy akční veličinou  $K_{uPI}\Delta\hat{u}_{PI}(nT)$ , viz (4.8):

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + T\Delta u_{PI}(nT) \quad (4.7)$$

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + K_{uPI}\Delta\hat{u}_{PI}(nT) \quad (4.8)$$

Standardní návrh fuzzy regulátorů je tvořen fuzzifikací, inferencí a defuzzifikací. FLC má dva vstupy:  $\hat{e}, \Delta\hat{e}$  a jeden výstup:  $\Delta\hat{u}_{PI}$  (obr. 4-1). Procesem nazývaným vstupní normalizace rozumíme transformaci měřítka ( $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPI}$ ), které mapuje fyzikální (ostré) hodnoty stavu procesu ( $e, \Delta e$ ) do normalizovaných oblastí ( $\hat{e}, \Delta\hat{e}$ ). Výstupní denormalizace mapuje normalizovanou hodnotu přírůstku akční veličiny  $\Delta\hat{u}_{PI}$  na příslušnou fyzikální oblast  $\Delta u_{PI}$ . Obecný fuzzy PI regulátor jsou definován čtyřmi pravidly [13].

**Tab. 1: Příklad jednoho pravidla R1 pro fuzzy PI regulátor**

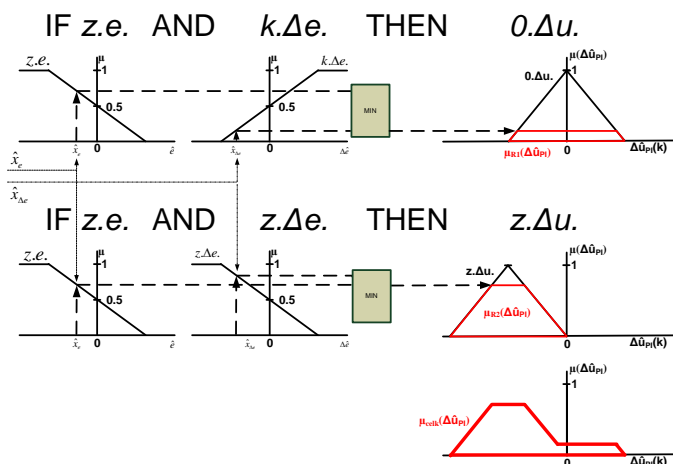
R1: IF  $\hat{e}(k-1)$  is  $z.e.$  AND  $\Delta\hat{e}(k)$  is  $z.\Delta e.$  THEN  $\Delta\hat{u}_{PI}(k)$  is  $z.\Delta u.$

$$e = w - y \quad (4.9)$$

$$\Delta e = \dot{e} = 0 - \dot{y} = -\dot{y} \quad (4.10)$$

Uvažujeme-li pravidlo R1, podmínka  $z.e.$  (tj. regulační odchylka  $e$  je záporná) implikuje ze vztahu (4.9), že regulovaná veličina  $y$  systému je vyšší než žádaná hodnota  $w$ , a  $z.\Delta e.$  (změna regulační odchylky ( $\Delta e$  je záporná) implikuje (za podmínky, že žádaná hodnota  $w(t)$  je konstantní) z rovnice (4.10), že  $\dot{y} > 0$ , tj. regulátor oproti předchozímu kroku zvýšil změnu regulační odchylky, a vede výstup systému směrem vzhůru od žádané hodnoty. Z tohoto důvodu je potřeba nastavit přírůstek akční veličiny  $\Delta\hat{u}_{PI}$  záporný tj.  $z.\Delta u.$ , regulovat systém směrem dolů k žádané hodnotě. Podobně pravidla R2, R3 a R4 jsou odvozena na stejném principu. Základní funkcí inferenčního

bloku je vypočítat celkovou hodnotu přírůstku akční veličiny na základě jednotlivých příspěvků každého pravidla z báze pravidel. Je provedena Mamdaniho implikace. Výsledné fuzzy množiny z každého pravidla sloučeny do množiny celkového regulačního výstupu, viz obr. 4-2.



**Obr. 4-2: Výstupní množina pro dvě pravidla a dvourozměrnou závislost**

Třetím krokem je defuzzifikace výstupní množiny, jejímž úkolem je přiřadit výstupním množině lingvistických proměnných ostrou hodnotu přírůstku akční veličiny, viz metoda „Centre of Area“ (COA), která je definována vztahem:

$$\Delta\hat{u}_{PI_{COA}} = \frac{\int \mu_{CELK}(\Delta\hat{u}_{PI}) \cdot \Delta\hat{u}_{PI} \, d\Delta\hat{u}_{PI}}{\int \mu_{CELK}(\Delta\hat{u}_{PI}) \, d\Delta\hat{u}_{PI}} \quad (4.11)$$

## 4.2 Faktory ovlivňující kvalitu fuzzy regulace

Na kvalitu fuzzy regulace má vliv vliv funkce příslušnosti, volba počtu funkcí příslušnosti, výška hladiny průseku, tvar funkcí příslušnosti, rozmístění funkcí příslušnosti v rámci universa, metoda použitá při defuzzifikaci, návrh báze pravidel a báze dat, volba měřítka universa při normalizaci a denormalizaci - parametry  $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPI}$ . V článku [22] je zajímavý pohled na vliv funkcí příslušnosti na dynamiku regulačních pochodů má vliv celá řada parametrů. Volba měřítek universa  $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPI}$  byla vyhodnocena jako jeden ze stěžejních prvků návrhu regulace. Princip spočívá ve vážení - násobení konstantou vstupní a výstupní proměnné FLC. Na vstupu FLC měníme měřítka universa pomocí vah  $K_e, K_{\Delta e}$  a pomocí zesílení  $K_{uPI}$  měníme měřítka na výstupu.



---

## 5 Modelování technologického procesu vyvíječe páry

### 5.1 Nelineární model procesu výroby páry

Vzhledem k náročnosti provádění experimentů a testů na reálném zařízení, a to jak z ekonomických, tak samozřejmě i z bezpečnostních důvodů, je logickým krokem snaha o vytvoření simulačního modelu. Na našem pracovišti byl v rámci disertační práce [8] vytvořen nelineární stavový model procesu výroby páry na principu rozložených parametrů v prostoru. Doba výpočtů simulací ve spojení s regulačním obvodem je vzhledem ke komplexnosti nelineárního modelu 30-45min. Pro návrh a verifikaci řídicích algoritmů je proto vhodnější alternativou použít lineární model, který slouží k prvním odhadům parametrů fuzzy regulátorů. Využívá se možnosti vytvoření sady lineárních modelů, kde každý jednotlivý model pracuje v úzkém okolí svého pracovního bodu a mezi těmito lokálními modely je řešeno vzájemné přepínání. Práce se také zabývá parametrickou identifikací této sady a jejím upřesněním [V3].

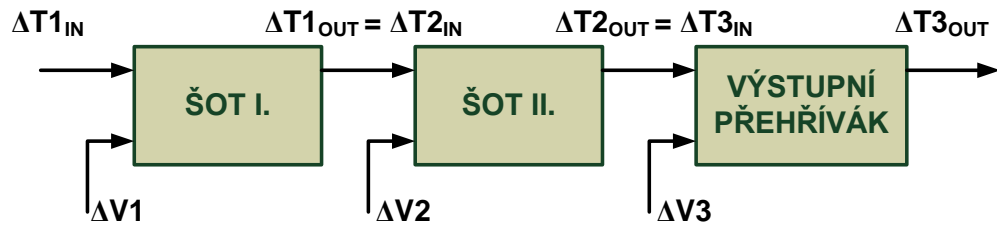
### 5.2 Síť lokálně lineárních modelů pro VT část

Struktura je inspirována reálným technologickým popisem dle [23]. Vycházím z linearizovaného modelu pro soustavu vstříků, viz obr. 2-1 při definované výkonové hladině. Náhrada VT části nelineárního modelu je rozdělena do tří částí, viz obr. 5-1. Každý přehřívák je definován vlastním přírůstkovým linearizovaným modelem a tyto modely jsou propojeny v sérii. Síť lokálních modelů pro VT část je možno implementovat jako síť obrazových přenosů, které jsou určeny v pracovním bodě nelineární charakteristiky. Pro Šoty I, II a výstupní přehřívák VP (obr. 5-1) je možno konstatovat, že nelineární charakteristika pro určení ustálené hodnoty výstupu přehříváku  $T_{OUT}(\infty)$  je určena třírozměrnou funkcí:

$$T_{OUT}(\infty) = f(P(\infty), T_{IN}(\infty), v_i(\infty)) \quad (5.1)$$

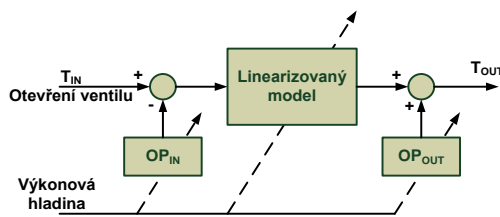
kde  $P(\infty)$  je ustálená výkonová hladina,  $T_{IN}(\infty)$  je ustálená vstupní teplota a  $v_i(\infty)$  ustálená hodnota otevření vstříkovacího ventilu. Pracovní bod, v jehož okolí můžeme provádět parametrickou identifikaci, je definován bodem čtyřrozměrného prostoru viz tab. 2. Souřadnice pracovního bodu je:

$$\{T_{OUT}(\infty), P(\infty), T_{IN}(\infty), v_i(\infty)\} \quad (5.2)$$

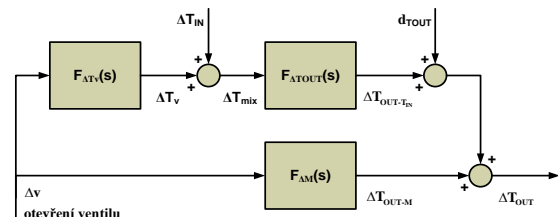


Obr. 5-1: Struktura náhrady VT části modelu průtočného kotle

Je zřejmé, že při modelování provozních režimů, kde dochází ke změně výkonové hladiny  $P(\infty)$ , vstupní teploty páry  $T_{IN}(\infty)$  a vstřiku  $v_i(\infty)$ , je nutno měnit v lokální síti modelů při modelování **regulačních pochodů nejen parametry obrazového přenosu, ale i zajistit posun pracovního bodu**. Struktura náhrady jednoho přehříváku je na obr. 5-2. Před linearizací je nutné zvolit množinu pracovních bodů. Každá výkonová hladina odpovídající pracovnímu bodu generuje jinou sadu proměnných, které zajišťují ustálený stav výstupu. Abychom při změně výkonové hladiny mohli provést posun do pracovního bodu a mohli se tak posouvat mezi jednotlivými pracovními body, je třeba přepínat podle hodnoty aktuálního výkonu nejen samotný model, ale i tyto proměnné. Pracovní body mohou být lineárně rozmístěny v pracovní oblasti, nebo mohou být zvoleny v závislosti na teorii GAP metriky [24]. V mém případě jsem zvolil rovnoměrné rozdělení, které je dostatečné.



Obr. 5-2: Struktura spojitě přepínaného lineárního modelu (náhrada přehříváku)



Obr. 5-3: Struktura lineární náhrady přehříváku

Obrázek (obr. 5-3) zobrazuje použitou strukturu náhradního lineárního modelu jednotlivých přehříváků s předřazeným vstřikem. Výhodou je, že Šoty I., Šoty II. a Výstupní přehřívák mají ekvivalentní strukturu a mění se jen parametry přenosových funkcí jednotlivých bloků v závislosti na definované hodnotě výkonové hladiny. Do modelu vstupují teplota  $\Delta T_{IN}$  z předchozího přehříváku, dále neměřená porucha

$d_{TOUT}$  a přírůstek akční veličiny  $\Delta v$ . Měřena je teplota  $\Delta T_{mix} = (\Delta T_{IN} + \Delta T_v)$  a výstupní teplota  $\Delta T_{OUT}$ . Identifikace přenosových funkcí je založena na datech simulovaných na nelineárním modelu v okolí požadovaných pracovních bodů výkonové hladiny. Aproximované parametry přenosových funkcí jsou obecně  $n$ -tého řádu s proměnnými časovými konstantami a zesíleními, které jsou funkcí výkonové hladiny. Výsledný řád celého identifikačního modelu je 13 (Šoty I. a II. čtvrtého řádu a vstupní přehřívák sedmého řádu). Spojením tří lineárních modelů SI, SII a VP získáme celou VT část technologického celku. Tento celek je testován změnami na jednotlivých ventilech při zachování konstantní úrovně výkonové hladiny pro verifikaci parametrů modelu a přechody mezi výkonovými hladinami. Po verifikačních testech jsem použil další dvě rozdílné metody porovnání originálního nelineárního a vytvořeného lineárního modelu.

**Tab. 2: Přehled statických parametrů pro ustálenou výkonovou hladinu**

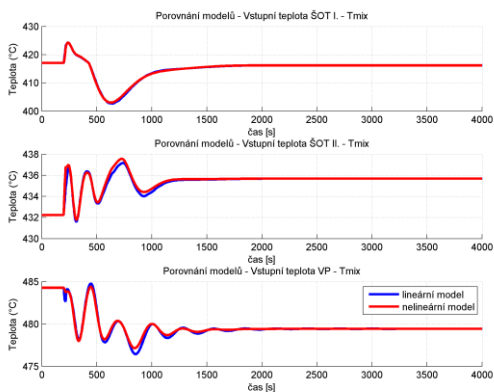
Výkon [%]	$V1_{OP}$ [-]	$V2_{OP}$ [-]	$V3_{OP}$ [-]	$T_{ST\ OP}$ [°C]	$T1_{IN\ OP}$ [°C]	$T1_{OUT\ OP}$ [°C]	$T2_{IN\ OP}$ [°C]	$T2_{OUT\ OP}$ [°C]	$T3_{IN\ OP}$ [°C]	$T3_{OUT\ OP}$ [°C]
50	0,01364	0,249	0,005952	418,48	417,08	460,00	432,24	485	484,28	575
60	0	0,2145	0,05849	416,19	416,20	454,06	435,69	485	479,44	575
70	0	0,2173	0,0966	419,74	419,74	453,71	439,04	485	477,64	575
80	0	0,2737	0,1179	426,13	426,13	457,16	442,26	485	477,71	575
90	0,1568	0,3273	0,1109	438,09	431,89	460,00	445,60	485	479,47	575
100	0,4711	0,3172	0,0732	450,55	435,00	460,00	448,78	485	481,96	575

metody „bez řízení“ a „s řízením“:

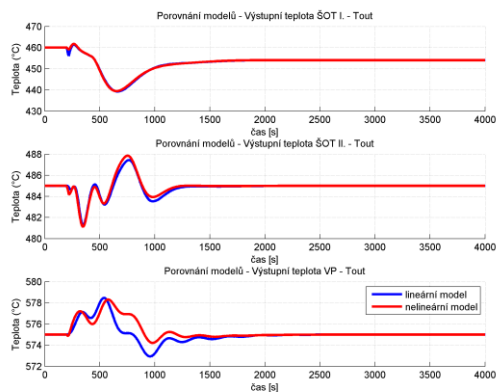
- Skoková změna výkonové hladiny z 50 % na 60 %
  - porovnání průběhů teplot za vstřikem (vstup do přehříváku) je na obr. 5-4
  - porovnání průběhů výstupních teplot je na obr. 5-5
  - porovnání průběhů akčních veličin
- Trendová změna výkonové hladiny z 50 % na 100 %
  - porovnání průběhů teplot za vstřikem (vstup do přehříváku)
  - porovnání průběhů výstupních teplot je na obr. 5-6
  - porovnání průběhů akčních veličin je na obr. 5-7

Výsledný simulační model je tvořen s cílem dosáhnout maximální přesnosti ve staticce, uspokojivé přesnosti v dynamice a rozumné výpočetní nároky. Náhrada

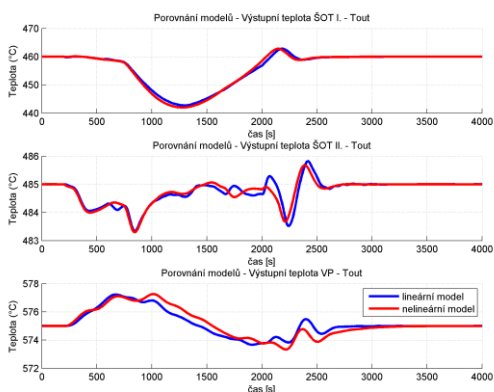
pomocí sítě lokálně lineárních modelů dosahuje přibližně 20x rychlejší simulační časy, ale i přesto je nezbytné při finálním testování používat originální nelineární model [V4].



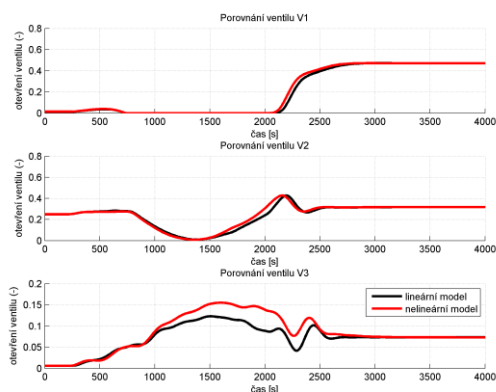
**Obr. 5-4: Metoda „bez řízení“ - porovnání  $T_{mix}$  – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %**



**Obr. 5-5: Metoda „bez řízení“ - porovnání  $T_{out}$  – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %**



**Obr. 5-6: Metoda „s řízením“ - porovnání  $T_{out}$  – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %**

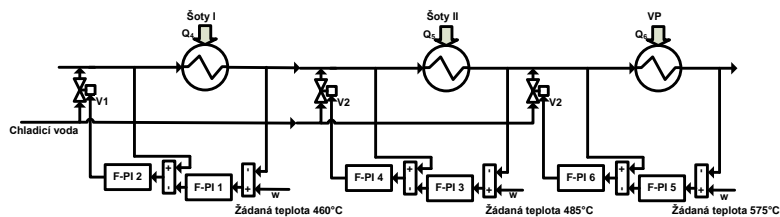


**Obr. 5-7: Metoda „s řízením“ - porovnání otevření ventilů – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %**

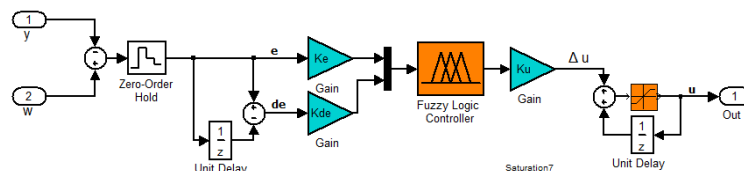
## 6 Optimalizace parametrů fuzzy PI regulátorů

### 6.1 Formulace optimalizační úlohy

Optimalizační úloha je chápána jako nalezení takových parametrů všech fuzzy PI regulátorů, aby při provozních teplotách páry na vstupu do vysokotlaké části byly zajištěny co nejmenší odchylky žádané teploty páry za Šoty I., za Šoty II. a výstupním přehřívákem VP pro všechny provozní režimy kotle viz tab. 2 a současně zajistit, aby byl regulační pochod dostatečně tlumený. Cílem je náhrada stávajícího řízení pomocí adaptivních PI regulátorů s proměnnými parametry za fuzzy PI regulátory (F-PI) [V5]. Struktura technologie přehřáté páry s kaskádním fuzzy PI řídicím systémem je na obr. 6-1. Struktura každého z použitých šesti fuzzy PI regulátorů viz obr. 6-2.



Obr. 6-1: Technologie VT části přehřáté páry s fuzzy PI řídicím systémem



Obr. 6-2: Struktura fuzzy PI regulátoru

### 6.2 Strategie optimalizace – pracovní hypotézy

Prvotní hledání parametrů lze získat heuristickým přístupem a optickým porovnáním výstupních průběhů, ale elegantnější řešení je využít možností optimalizačních přístupů. Minimalizační kritérium má obecně tvar (6.1):

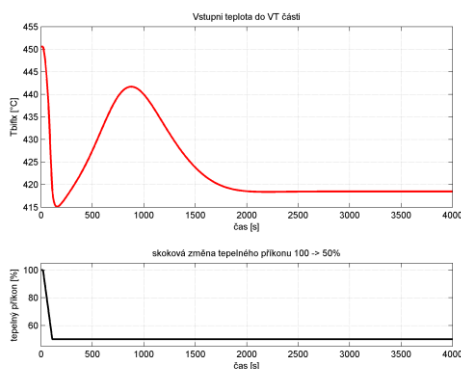
$$J(X) \cong \sum_{i=0}^N e(i, X)^2 = \sum_{i=0}^N [w(i) - y_M(i, X)]^2 \rightarrow \min \quad (6.1)$$

Při volbě strategie využijeme technologického zapojení procesu, který je složen ze tří přehříváků v sérii za sebou, a tedy první přehřívák při požadavku na změnu

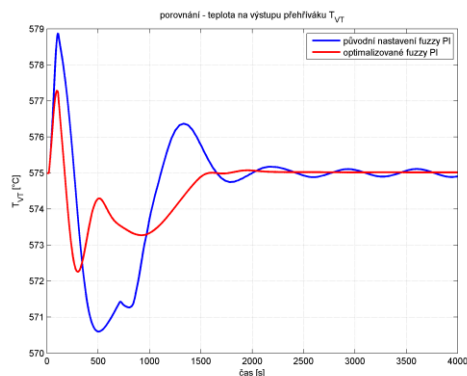
výkonové hladiny ovlivňuje dva v sérii následující přehříváky, viz obr. 6-1. Každý fuzzy PI regulátor obsahuje 3 parametry. Pokusme se tedy nejprve najít vhodné nastavení pro Šoty I. a v sérii pak postupovat až k výstupnímu přehříváku. Díky tomu již řešíme tři úlohy samostatně, z nichž u každé hledáme maximálně 6 parametrů.

### 6.3 Optimalizace založená na maximálním využití vstupních intervalů

V [25] je popsán princip nalezení takových hodnot měřítek  $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPI}$ , aby hodnoty vstupující do FLC obr. 6-2 byly transformovány tak, aby se využil maximálně celý rozsah universa, pro který je FLC navržen. Tato metoda byla ověřena na experimentu skokové změny tepelného výkonu ze 100 % na 50 % s trendem 50 %/90 s. která pokrývá celý výkonový rozsah. Tato změna vyvolá poruchovou reakci  $T_{biflx}$  až o 35 °C (obr. 6-3), na výstupu VT části požadujeme  $T_{VT}$  v toleranci  $\pm 2$  °C. Optimalizace probíhala přímo na nelineárním modelu. Porovnání průběhu optimalizované a původní regulace, viz obr. 6-4. Toto nastavení přináší výrazné zlepšení průběhu výstupní teploty. Nicméně i toto „ruční“ nastavení pokládáme za sub-optimální a pokusíme se ho vylepšit použitím některé z optimalizačních metod s využitím minimalizačních kritérií [V6].



Obr. 6-3: Reakce  $T_{biflx}$  při změně výkonové hladiny ze 100 na 50 %



Obr. 6-4: Porovnání původní a optimalizované nastavení fuzzy PI regulace

### 6.4 Optimalizace založená na minimalizačním kritériu

Pokusme se optimalizovat teplotní průběh na výstupu přehříváku VP, který je uveden červenou barvou na obr. 6-4. Cílem je, aby získaná sada parametrů byla vhodná

pro regulaci nejen pro skokovou změnu 100-50 %, ale i pro ostatní běžné operační režimy. Na základě provedených experimentů se jeví, že parametr  $K_{uPI}$  na výstupu jednotlivých fuzzy PI regulátorů nejvíce ovlivňuje kvalitu regulace. Dále lze pozorovat, že nejcitlivější na změny parametrů je poslední ze tří přehříváků v sérii VP. Proto vycházíme ze snížení počtu optimalizovaných parametrů, tak že vektor hledaných parametrů fuzzy regulátoru zahrnuje výstupní parametry  $K_{uPI}$  fuzzy PI regulátorů vnitřní i vnější smyčky přehříváků Šoty I., Šoty II. a VP, viz tab. 3 (žlutá barva) a pro případně doladění budou použity vstupní parametry  $K_e, K_{\Delta e}$  fuzzy PI regulátorů vnitřní i vnější smyčky přehříváku VP, viz tab. 3(modrá barva)

**Tab. 3: Výchozí sada parametrů z předchozí optimalizace**

	SI		SII		VP	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
$K_e$	0,037	0,1050	0,0650	0,1055	0,1	0,1
$K_{\Delta e}$	2,5	7,5	4,4	10,5	20	25
$K_{uPI}$	0,005	0,02	0,002	0,07	0,003	0,04

Vzhledem ke složitosti nelineárního modelu využijeme pro iterační výpočty optimalizační úlohy síť lokálně lineárních modelů, V kritériu je hledána minimální odchylka mezi žádaným průběhem výstupní teploty a simulovanou odezvou a v každém iteračním kroku je přizpůsobován vektor hledaných parametrů fuzzy regulátoru.

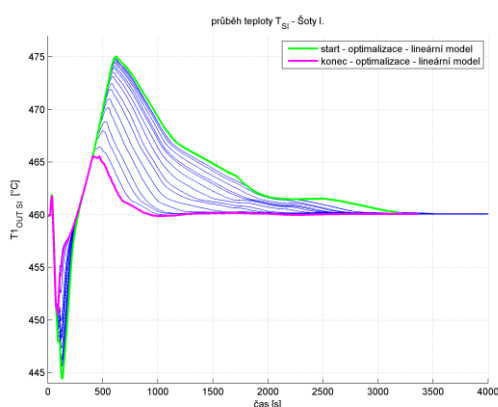
### 6.4.1 Postupná optimalizace dle struktury technologie

Pro první variantu optimalizační úlohy se nabízí sériová struktura zapojení přehříváků Šoty I., Šoty II. a VP. V prvním kroku je hledána dvojice parametrů výstupních zesílení  $K_{uPI-SI-IN}$  a  $K_{uPI-SI-OUT}$  pro F-PI-1 a F-PI-2 (obr. 6-1) vnitřní a vnější regulační smyčky Šoty I. Kvadratické minimalizační kritérium vychází z (6.1) a má tvar (6.2). Pro počáteční odhad parametrů je použito prozatímní nejlepší nastavení z předchozí kapitoly 6.3.  $T_{I OUT SI}$  je funkcí hledaných parametrů  $K_{uPI-SI-IN}$  a  $K_{uPI-SI-OUT}$  dle (6.3).

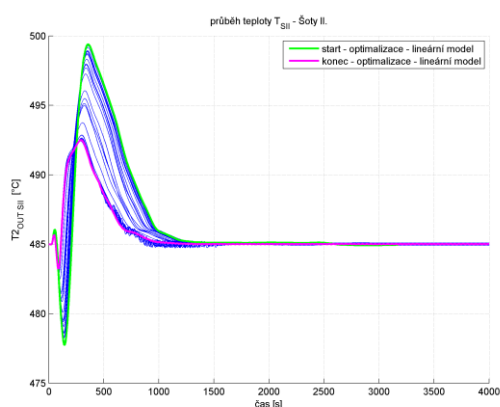
$$J(X) \cong \sum_{i=0}^N e(i, X)^2 = \sum_{i=0}^{4000} [460 - T_{I OUT SI}]^2 \rightarrow \min \quad (6.2)$$

$$T_{I OUT SI} = f(K_{uPI-SI-IN}, K_{uPI-SI-OUT}) \quad (6.3)$$

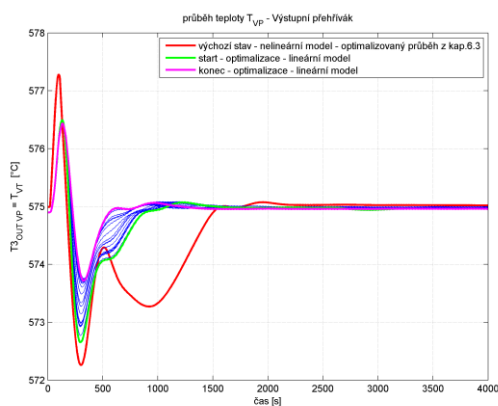
Na obr. 6-5 je průběh teploty na výstupu Šoty I. po optimalizaci 50 iteračních kroků. Optimalizací dvou parametrů jsme docílili výrazného zlepšení průběhu výstupní teploty Šoty I.  $T_{1\text{ OUT }SI}$  na lineárním modelu. Vzhledem k tomu, že přehřívák Šoty I. je předřazen před přehříváky Šoty II. a VP, projevila se tato změna kladně i na výstupní teplotě  $T_{2\text{ OUT }SII}$  Šoty II. viz obr. 6-6, i na teplotě  $T_{VT}$  viz obr. 6-7. Optimalizované parametry použijeme v druhém kroku jako počáteční odhad a přejdeme k optimalizaci výstupních parametrů fuzzy PI regulátoru  $K_{uPI-SII-IN}$  a  $K_{uPI-SII-OUT}$  na Šoty II.



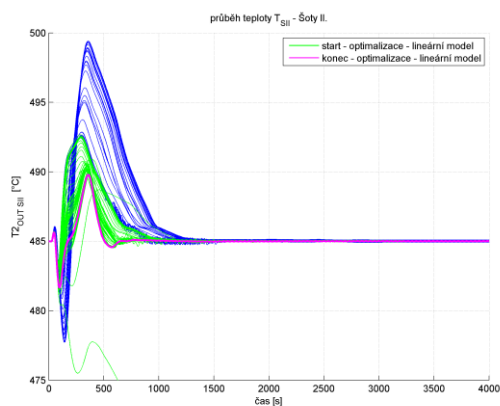
**Obr. 6-5: Optimalizace parametrů Šoty I. – odezvy teploty na výstupu Šoty I.**



**Obr. 6-6: Optimalizace parametrů Šoty I. – odezvy teploty na výstupu Šoty II.**



**Obr. 6-7: Optimalizace parametrů Šoty I. – odezvy teploty  $T_{VT}$  na výstupu VP**



**Obr. 6-8: Optimalizace parametrů Šoty II. – odezvy teploty na výstupu Šoty II.**

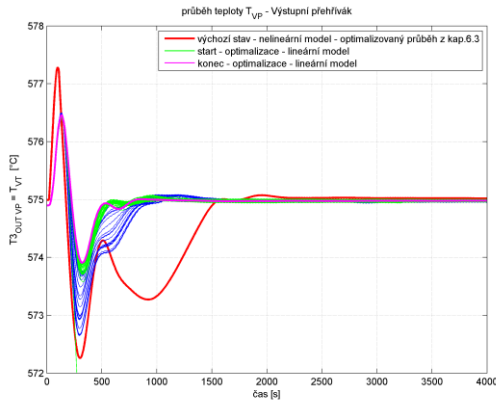
Druhým krokem je optimalizace na Šoty II. Kritérium má tvar (6.4), teplota je funkcí parametrů dle (6.5). Obr. 6-8 je rozšířením grafu z obr. 6-6. Je stále zřetelné



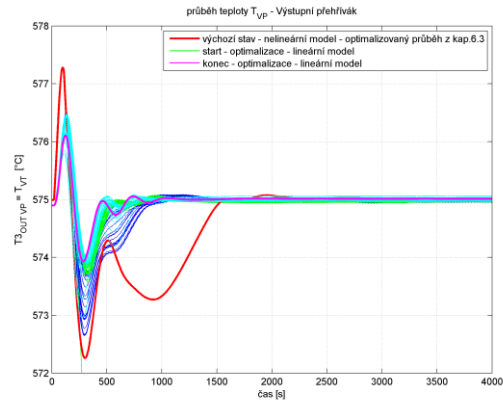
zlepšení na průběhu teploty  $T_{2\ OUT\ SII}$ , na průběhu teploty  $T_{VT}$  se však zásadně neprojeví, viz obr. 6-9

$$J(X) \cong \sum_{i=0}^N e(i, X)^2 = \sum_{i=0}^{4000} [485 - T_{2\ OUT\ SII}]^2 \rightarrow \min \quad (6.4)$$

$$T_{2\ OUT\ SII} = f(K_{uPI-SII-IN}, K_{uPI-SII-OUT}) \quad (6.5)$$



**Obr. 6-9: Optimalizace parametrů Šoty II. – odezvy teploty na výstupu VP**



**Obr. 6-10: Optimalizace parametrů VP – odezvy teploty  $T_{VT}$  na výstupu VP**

V posledním, třetím kroku provedeme optimalizační úlohu výstupních parametrů fuzzy PI regulátoru  $K_{uPI-VP-IN}$  a  $K_{uPI-VP-OUT}$  pro výstupní teplotu přehříváku  $T_{VT}$ , viz obr. 6-10. Kritérium pro optimalizaci parametrů VP má tvar (6.6). Je zřejmé, že největší váhu při optimalizaci průběhu výstupní teploty výstupního přehříváku  $T_{VT}$  mají parametry fuzzy regulátorů na Šoty I. a VP.

$$J(X) \cong \sum_{i=0}^N e(i, X)^2 = \sum_{i=0}^{4000} [575 - T_{VT}]^2 \rightarrow \min \quad (6.6)$$

$$T_{VT} = f(K_{uPI-VP-IN}, K_{uPI-VP-OUT}) \quad (6.7)$$

### 6.4.2 Optimalizace parametrů podle teploty na výstupním přehříváku VP

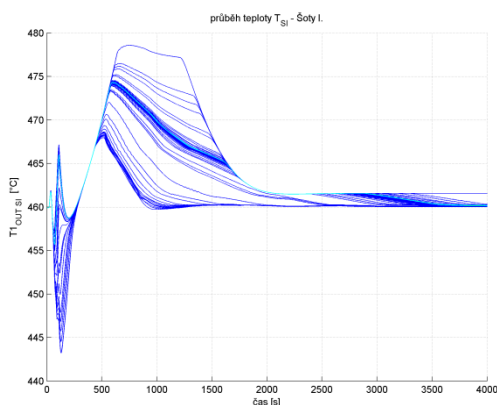
V této části byl vyzkoušen přístup, kde kritérium zůstane ve všech krocích totožné a bude v něm figurovat pouze výstupní teplota  $T_{VT}$ . Kritérium pro optimalizační úlohu má tvar (6.8). teplota  $T_{VT}$  je v jednotlivých krocích funkcí dle (6.9), (6.10) a (6.11) viz obr. 6-11, obr. 6-12 a obr. 6-13.

$$J(X) \cong \sum_{i=0}^N e(i, X)^2 = \sum_{i=0}^{4000} [575 - T_{VT}]^2 \rightarrow \min \quad (6.8)$$

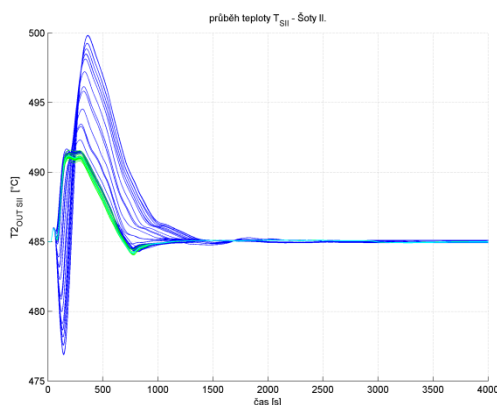
$$T_{VT} = f(K_{uPI-SI-IN}, K_{uPI-SI-OUT}) \quad (6.9)$$

$$T_{VT} = f(K_{uPI-SII-IN}, K_{uPI-SII-OUT}) \quad (6.10)$$

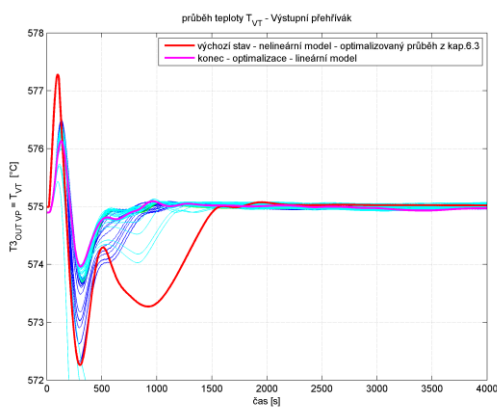
$$T_{VT} = f(K_{uPI-VP-IN}, K_{uPI-VP-OUT}) \quad (6.11)$$



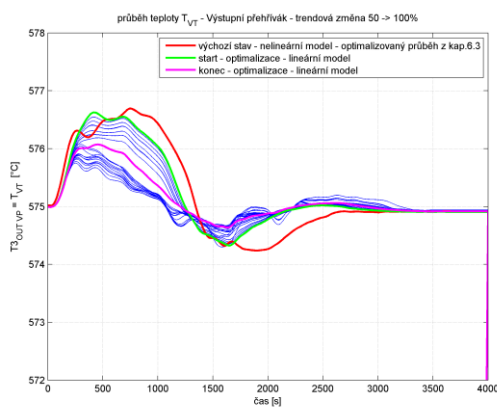
Obr. 6-11: Optimalizace - průběh teploty na SI



Obr. 6-12: Optimalizace - průběh teploty na SII



Obr. 6-13: Optimalizace parametrů SI, SII a VP – průběh teploty  $T_{VT}$  na výstupu VP

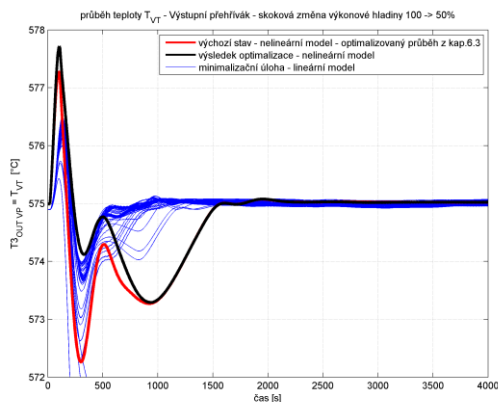


Obr. 6-14: Optimalizace parametrů SI, SII a VP – průběh teploty  $T_{VT}$  na výstupu VP – trendová změna výkonu 50-100 %

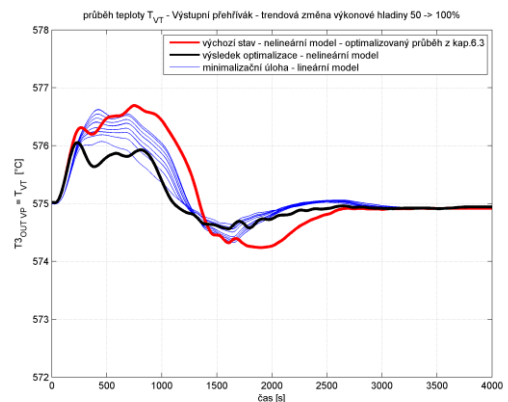
### 6.4.3 Ověření výsledků optimalizace na trendovou změnu výkonu na linearizovaném modelu a ověření na nelineárním modelu

Ze dvou optimalizačních úloh byly získány dvě sady parametrů, které byly ověřeny na nelineárním modelu pro stejnou skokovou změnu výkonové hladiny ze 100 %

na 50 %. Průběh  $T_{VT}$  odpovídá výsledkům z lineárního modelu a pohybuje se v požadované toleranci, nicméně vykazuje malé oscilace kolem žádané hodnoty. Logickým krokem je ověření na jiné než skokové změny výkonu. Byla vybrána trendová změna 50 % - 100 % s rychlostí 10 MWt/60 s, která pokrývá celý rozsah. I zde byla provedena optimalizační úloha, viz obr. 6-14. Abychom našli kompromisní řešení mezi oběma typy operačních režimů a vyhnuli se nežádoucím oscilacím, použili jsme jako výsledné parametry ty, které odpovídají purpurovému průběhu zhruba uprostřed optimalizace a které se nejvíce blíží parametrům získaných z optimalizačních úloh pro skokové změny, viz tab. 4. Takto získané kompromisní řešení je ověřeno simulačními experimenty jak na skokové, tak trendové změně výkonu na nelineárním modelu, viz obr. 6-15 a obr. 6-16. Lze konstatovat, že realizací minimalizačního kritéria bylo dosaženo zlepšení odezev regulované soustavy pro reakce na běžné operační režimy reprezentované skokovými a trendovými změnami přes celý rozsah sledovaných změn výkonových hladin.



**Obr. 6-15: Výsledné porovnání optimalizace - odezva  $T_{VT}$  na skokovou změnu výkonu**



**Obr. 6-16: Výsledné porovnání optimalizace - odezva  $T_{VT}$  na trendovou změnu výkonu**

**Tab. 4: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výkonu 100 - 50 %**

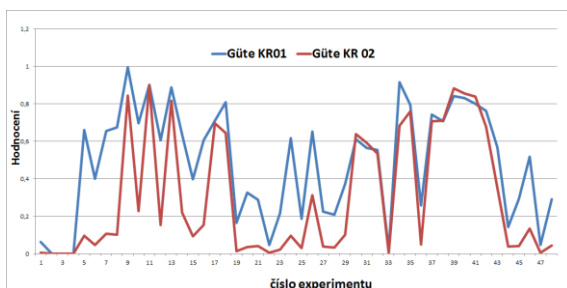
	SI		SII		VP	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
$K_e$	0,037	0,1050	0,0650	0,1055	0,75	0,11
$K_{\Delta e}$	2,5	7,5	4,4	10,5	75	10
$K_{uPI}$	0,005	0,06	0,002	0,07	0,0009	0,075

---

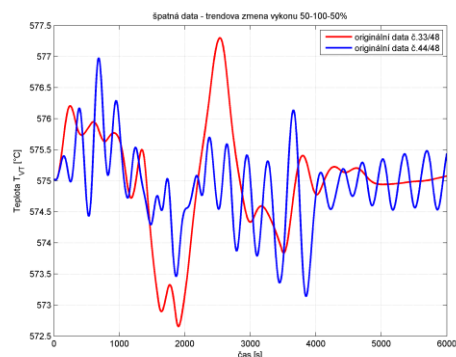
## 6.5 Klasifikace výsledků – Fuzzy Pattern klasifikace

### 6.5.1 Popis klasifikační metody

Jako nástroj pro klasifikaci získaných dat jsem si vybral metodu Fuzzy Pattern klasifikace a software LOKALIMO [26]. Hodnocení této klasifikační úlohy bylo provedeno nejprve na souboru dat získaných z uskutečněných prvních 48 simulačních experimentů při trendové změně výkonové hladiny z 50 % na 100 % a zpět na 50% s trendem 10 MWt za 60 s. Data byla aproximována polynomem 12. řádu a použity první tři parametry polynomu  $p_0$ ,  $p_1$  a  $p_2$ . Nejprve jsem zvolil z daného setu experimentů 8 průběhů, z nichž dva jsem subjektivně posoudil jako nekvalitní, č. 33 (amplituda překmitu) a č. 44 (kmitání), viz obr. 6-20. Tyto experimenty byly ohodnoceny a na tomto základě byla zvolena třída KR01 jako akceptovatelnější pro hodnocení průběhů, viz obr. 6-17. Tímto způsobem jsme získali nástroj pro hodnocení kvality testovaných průběhů. Podívejme se na průběhy č. 44 (velmi kmitavý, obr. 6-18) a č. 41 (momentálně ze sady (48) nejlepší, viz obr. 6-28)



Obr. 6-17: Vyhodnocení kvality 48 experimentů pro dvě potenciální funkce



Obr. 6-18: Subjektivní posouzení nekvalitních průběhů č. 33 a č. 44

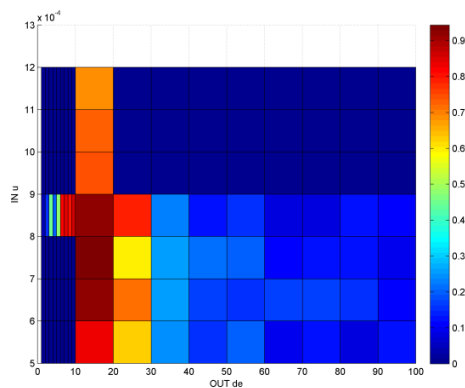
### 6.5.2 Analýza parametrů fuzzy PI regulátoru a souvislost s výsledky Fuzzy Pattern klasifikace

Zjistíme, že z 18 parametrů se liší pouze dva, viz tab. 5. Cílem je otestovat, který z parametrů a jak výrazně ovlivňuje výsledný průběh výstupní teploty přehřáté páry. Proto jsem provedl novou sadu experimentů, při nichž jsem měnil tyto parametry s krokem v daném intervalu, viz tab. 5 a vygeneroval jsem 50 +12 simulací.

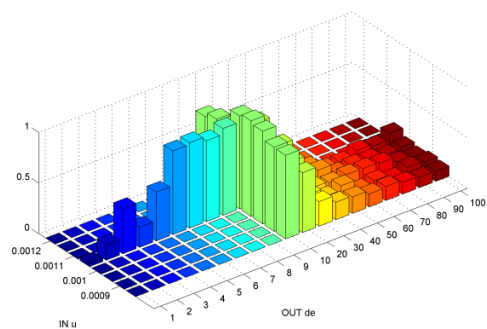
**Tab. 5: Porovnání parametrů pro experiment č. 44 a č. 41**

Parametr	špatné nastavení č. 44	dobré nastavení č. 41	rozsah	počet kroků
$IN u$	0,0005	0,0009	0,0005 : 0,0001 : 0,0009	5
$OUT de$	100	10	100 : -10 : 10	10

Pozitivní ohodnocení získaly průběhy v blízkosti námi hodnoceného dobrého průběhu č. 41, viz znázornění rozložení ohodnocení vůči parametrům z tab. 5 na obrázcích obr. 6-19 a obr. 6-20. Citlivost změny parametru  $K_{uPI} \sim IN u$  v závislosti na  $K_{\Delta e} \sim OUT de$  je nižší a má menší vliv na kvalitu průběhu (nicméně i parametr  $IN u$  má částečný vliv na kvalitu regulace (amplituda překmitu) v kombinaci s dalšími parametry, jak ukážeme v další části), zatímco parametr  $K_{\Delta e} \sim OUT de$  při změně z hodnoty 100 na hodnotu 10 zvyšuje kvalitu průběhu teploty.



**Obr. 6-19: Závislost parametrů  $IN u$  a  $OUT de$  na ohodnocení kvality - 2D**



**Obr. 6-20: Závislost parametrů  $IN u$  a  $OUT de$  na ohodnocení kvality - 3D**

**Tab. 6: Porovnání parametrů pro experiment č. 33 a č. 41**

Parametr	špatné nastavení č. 33	dobré nastavení č. 41	rozsah	počet kroků
$IN de$	50	100	50 : 25 : 125	4
$IN e$	0,15	0,75	0,15 : 0,3 : 1,05	4
$IN u$	0,0002	0,0009	0,0002 : 0,00035 : 0,00125	4
$OUT u$	0,1	0,0075	0,1 : -0,025 : 0,0050	3

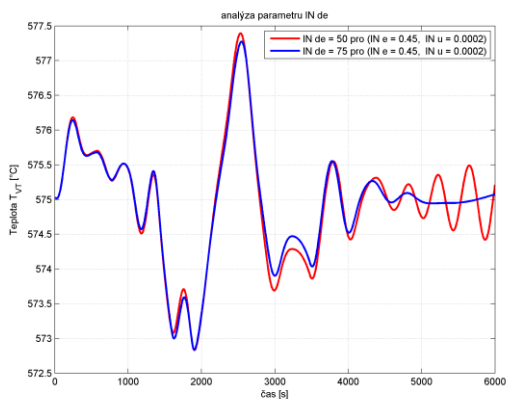
Stejně tak se můžeme zaměřit na druhé srovnání, a to průběh s relativně velkým překmitem č. 33 a naší referencí č. 41, viz obr. 6-18. Zde se odlišují čtyři parametry fuzzy PI regulátorů, viz tab. 6. Další sada experimentů vznikla provedením simulačních

---

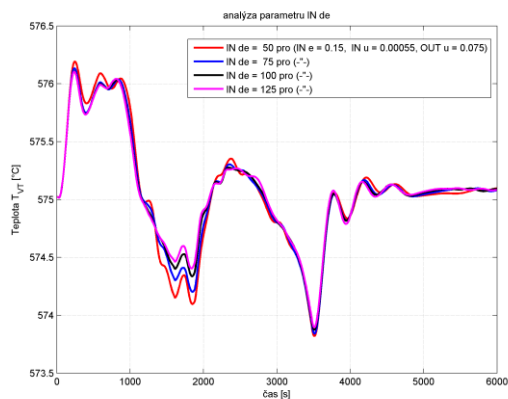
experimentů při změně parametrů s daným krokem v rozsahu, a bylo tak získáno 192 simulovaných průběhů teploty přehřáté páry. Z analýzy těchto dat bylo zjištěno, že na průběhy mají vliv kombinace všech 4 parametrů, které dále rozebereme.

Analýzu vlivu jednotlivých parametrů lze shrnout do následujících bodů:

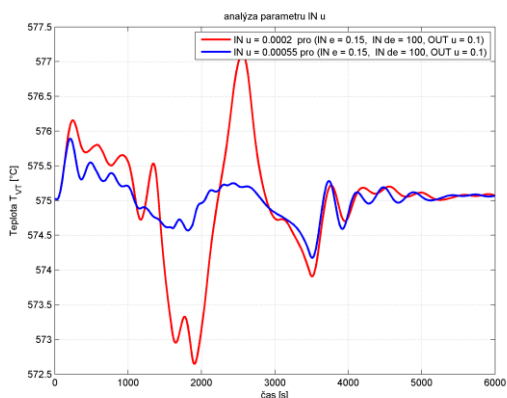
1.  $IN\ de$  - má vliv na tlumení oscilací na konci průběhu. Pokud nastane kombinace  $IN\ e > 0,15$  a  $IN\ u = 0,0002$ , pak je nutné nastavit  $IN\ de > 75$ , jinak teplota na konci experimentu výrazně osciluje kolem žádané hodnoty, viz obr. 6-21. Dále má  $IN\ de$  vliv na oscilace a velikost amplitudy překmitu uprostřed průběhu, nejvýrazněji je tento vliv pozorovatelný při kombinaci parametrů ( $IN\ e = 0,15$ ,  $IN\ u = 0,00055$ ,  $OUT\ u = 0,075$ ), viz obr. 6-22. Doporučením je používat vyšší hodnotu parametru  $IN\ de$ .
2.  $IN\ u$  - má vliv na amplitudu překmitu, zejména uprostřed průběhu. Pokud je  $IN\ u < 0,00055$ , pak je překmit zhruba uprostřed průběhu na extrémní hodnotě. Doporučením je nepoužít parametr  $IN\ u$  s koeficientem menším než 0,00055, volit ho vyšší, a zároveň úměrně zvyšovat  $IN\ de$ , viz obr. 6-23.
3.  $IN\ e$  - jeho různé hodnoty z tab. 6 nemají téměř vliv a simulované průběhy jsou téměř identické, viz obr. 6-24. V kombinaci s parametrem  $IN\ u = 0,0002$  ale vznikají oscilace na konci průběhu. Pokud zanecháme tento parametr na hodnotě 0,0002, pak od hodnoty  $IN\ e > 0,15$  musíme korigovat oscilace úpravou a zvýšením parametru  $IN\ de > 75$ , nebo lze korigovat snížením hodnoty  $OUT\ u$ , která má také vliv na potlačení kmitů.
4.  $OUT\ u$  - volba parametru  $OUT\ u$  má vliv na velikost amplitudy překmitu teploty přehřáté páry. Čím vyšší je hodnota parametru, tím menšího překmitu dosáhneme, ale za cenu větší amplitudy tlumených kmitů. Ideální volbou je určitý kompromis a volba střední hodnoty  $OUT\ u = 0,075$ , viz obr. 6-25



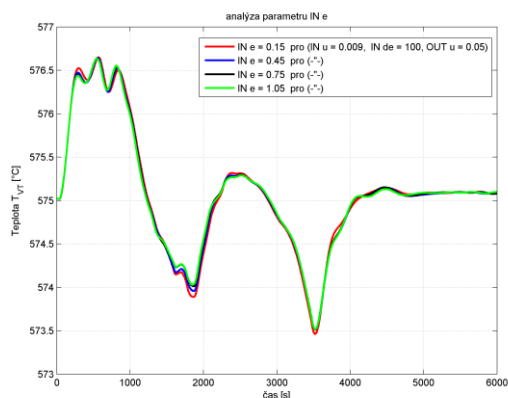
Obr. 6-21: Analýza  $IN\ de$  - porovnání vlivu na oscilace



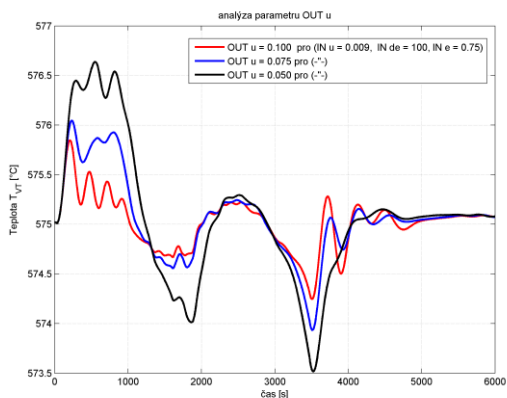
Obr. 6-22: Analýza  $IN\ de$  - porovnání vlivu na tlumení překmitu



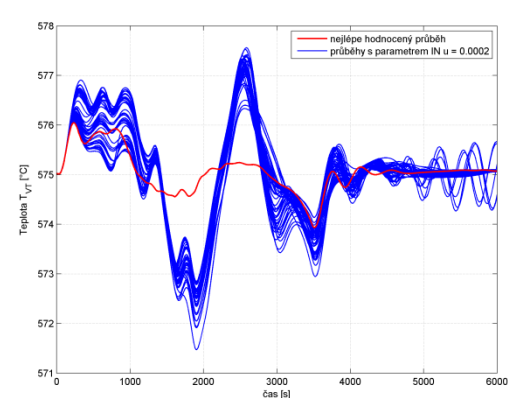
Obr. 6-23: Analýza  $IN\ u$  - porovnání vlivu na překmit



Obr. 6-24: Analýza  $IN\ e$  - porovnání

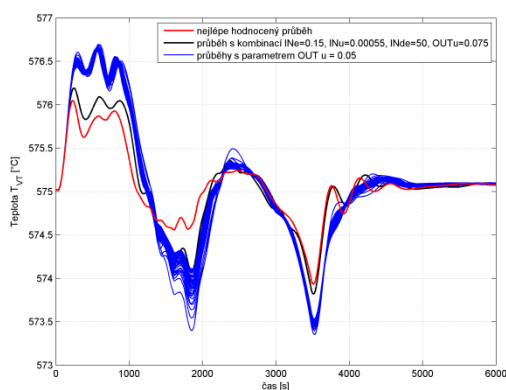


Obr. 6-25: Analýza  $OUT\ u$  - porovnání vlivu na velikost překmitu



Obr. 6-26: Průběhy v pořadí 145-192

Nyní analýzu parametrů porovnáme s výsledky ohodnocení jednotlivých experimentů pomocí Fuzzy Pattern klasifikace softwarem LOKALIMO. Více vypovídající je 3D zobrazení obr. 6-29, kde na ose  $x$  a  $y$  jsou parametry  $OUT u$  a  $IN u$ . Na ose  $z$  je přiřazeno odpovídající ohodnocení při libovolných kombinacích  $IN de$  a  $IN e$ . Lze tvrdit, že průběh ohodnocení v oblasti  $OUT u$  a  $IN u$  má vždy velmi podobný tvar. Odezvy teploty získané simulací systému a regulačního obvodu s parametrem  $IN u = 0,0002$  fuzzy PI regulátoru vnitřní smyčky výstupního přehříváku, viz obr. 6-26, (souhlasí s bodem č. 2 - velká amplituda překmitu uprostřed průběhu v intervalu  $\langle +3\text{ }^\circ\text{C}; -3,5\text{ }^\circ\text{C} \rangle$ , a s bodem č. 3 - oscilace na konci průběhu) jsou ohodnoceny až na posledních místech (pořadí umístění 145-192, ohodnocení na velmi nízké úrovni 0,0706 až 0,0064). Pořadí 96 až 144 bylo přiřazeno průběhům s parametrem  $OUT u = 0,05$  (souhlasí s bodem č. 4, velký překmit viz výše). Do tohoto intervalu je zařazen ještě jeden průběh  $OUT u = 0,075$ , protože se jedná o nevhodnou kombinaci ( $IN e = 0,15$ ;  $IN u = 0,00055$ ;  $IN de = 50$ , viz obr. 6-22) z bodu č. 1. Průběhy získaly ohodnocení v rozmezí 0,5258 až 0,1661. Tyto průběhy už jsou při optickém srovnání kvalitnější (amplituda překmitu v intervalu  $\langle +1,5\text{ }^\circ\text{C}; -2,5\text{ }^\circ\text{C} \rangle$ , bez oscilací na konci průběhu), viz obr. 6-27.



Obr. 6-27: Průběhy v pořadí 96-144

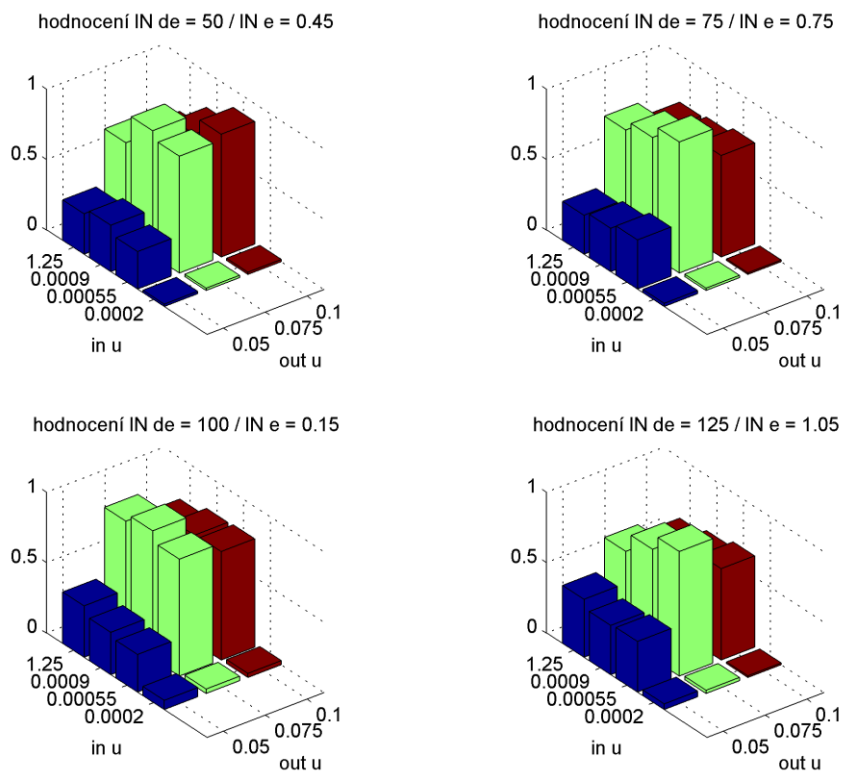


Obr. 6-28: Nejlépe hodnocené průběhy odezvy teploty  $T_{VT}$

Prvních 30 míst obsadily průběhy s parametrem  $OUT u = 0,075$  (souhlasí s bodem č. 4), s výjimkou jednoho průběhu s parametrem  $OUT u = 0,1$ . Ohodnocení těchto průběhů je v rozmezí 0,9504 až 0,8284. Všechny tyto průběhy jsou v intervalu



$\pm 1$  °C, viz obr. 6-28. Jak již bylo řečeno, nejhorších výsledků dosahují průběhy s parametrem  $IN u = 0,0002$  a dále průběhy s parametrem  $OUT u = 0,05$ . Nejlepších průběhů dosahují průběhy s parametrem  $OUT u = 0,075$ . Na obr. 6-29 je zobrazena část výsledků (48) pro různé kombinace  $IN de$  a  $IN e$ . Na základě uvedených výsledků analýzy parametrů a jejího srovnání s výsledky ohodnocení pomocí Fuzzy Pattern klasifikace můžeme konstatovat, že tento nástroj je schopen velmi dobře automaticky klasifikovat průběhy získané z optimalizačních úloh. Dokáže zachytit a negativně ohodnotit (ohodnocení stupněm příslušnosti blízko k nule) nejen průběhy s velkým překmitem, ale i průběhy, které sice nemají velkou amplitudu překmitu, ale oscilují v blízkém okolí žádané hodnoty. Oba tyto trendy jsou samozřejmě nežádoucí.



**Obr. 6-29: Závislost  $OUT u$  a  $IN u$  na libovolné kombinaci  $IN de$  a  $IN e$**

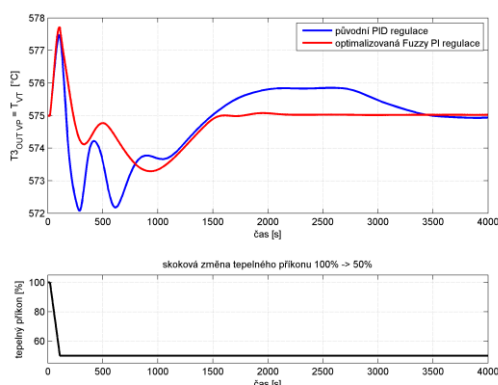
---

## 7 Simulační experimenty

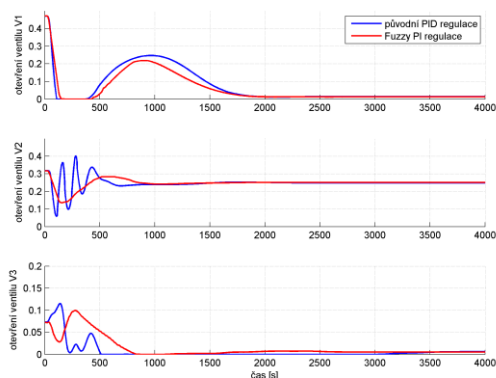
### 7.1 Verifikační experimenty operačních režimů na nelineárním modelu

#### 7.1.1 Reakce na skokovou změnu tepelného výkonu ze 100 % na 50 %

Následující situace byla popsána v kapitole 6.3 a porovnává reakci fuzzy regulačního systému s původním PI řídicím systémem na skokovou změnu tepelného výkonu ze 100 % na 50 % s rychlým trendem 50 % za 90 s. Na obr. 7-1 je porovnání odezvy teploty na výstupním přehříváku  $T_{VT}$ . Odezvy získané na nelineárním modelu ve spolupráci s fuzzy regulačním systémem jsou mnohem hladší a nevykazují takové oscilace jako původní PI řídicí systém.



**Obr. 7-1:** Porovnání odezvy teploty  $T_{VT}$  původní PI a fuzzy PI regulace na skokovou změnu výkonové hladiny 100-50 %

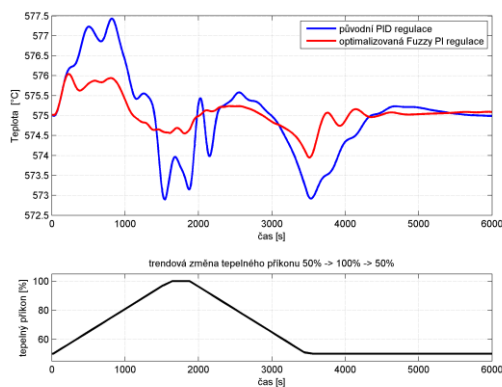


**Obr. 7-2:** Porovnání průběhů akčních zásahů – vstřikovacích ventilů  $V1$ ,  $V2$  a  $V3$

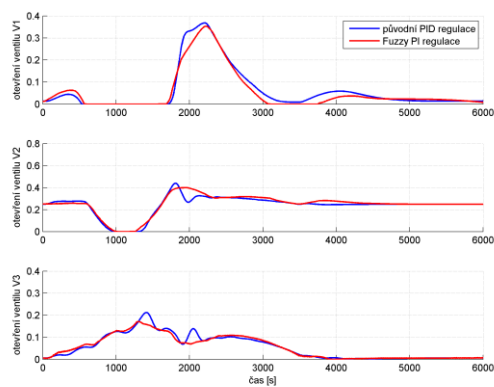
To je patrné i na průběhu akčních zásahů, tedy otevření vstřikovacích ventilů, viz obr. 7-2. Otvírání ventilu  $V2$  je mnohem klidnější, nedochází ke kmitání, což má samozřejmě vliv i na životnost zařízení. Je patrné, že se teplota při fuzzy regulaci ustálí na žádané hodnotě zhruba po  $t = 1600$  s, zatímco při původní PI regulaci je tohoto ustálení dosaženo za 4000 s. Také amplituda překmitů v přechodové části je pro fuzzy regulační systém nižší.

### 7.1.2 Reakce na trendovou změnu výkonové hladiny 50 % – 100 % – 50 %

Funkčnost implementovaného fuzzy regulačního systému byla také ověřena simulačním experimentem v podobě trendové změny výkonové hladiny [V7]. V experimentu se v čase 20 s výkonová hladina postupně mění viz obr. 7-3. V rámci experimentu je pokryt celý rozsah výkonové hladiny (50 % až 100 %), po který je vyráběna elektrická energie. Časový průběh změny výkonové hladiny je uveden společně s porovnáním odezev teploty  $T_{VT}$  původní PI regulace a fuzzy regulace na obr. 7-3. Fuzzy regulace se pohybuje v intervalu  $\pm 1$  °C oproti  $\pm 2,5$  °C původní PI regulace. Reakce akčních zásahů – poloha vstřikovacích ventilů je na obr. 7-4.



Obr. 7-3: Porovnání odezvy teploty  $T_{VT}$  původní PI a fuzzy PI regulace na trendovou změnu výkonové hladiny 50 % – 100 % – 50 %

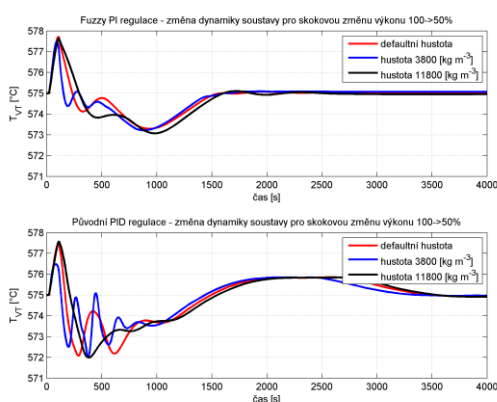


Obr. 7-4: Porovnání průběhů akčních zásahů – poloha vstřikovacích ventilů V1, V2 a V3

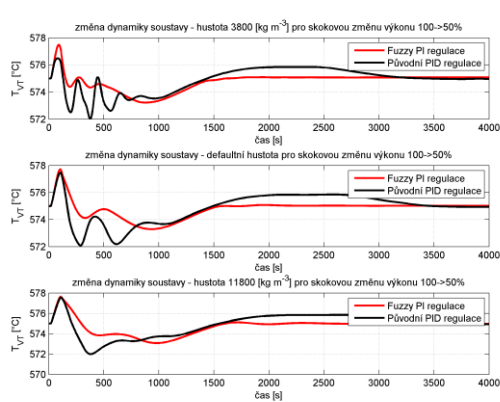
## 7.2 Ověření vlastností chování při změně dynamiky soustavy

Z hlediska implementace regulačních algoritmů je významná otázka, jak se změní regulační pochody, bude-li změněna dynamika procesu přehřevu páry? Proto je nedílnou součástí této práce ověření vlastností regulačních pochodů při změně dynamice soustavy. Nejsnadnějším způsobem jak docílit změny dynamiky soustavy je úprava materiálové hustoty. Modifikoval jsem používaný nelineární model změnou parametrů určující hustotu materiálu technologických celků přehřevu páry, ze kterých jsou tepelné výměníky vyrobeny. V experimentu je simulována situace, kde je před

spuštěním simulace nejprve přehřívákům Šoty I., Šoty II. a VP změněna hustota na hodnotu  $\rho_{Fe} = 3800 \text{ kg/m}^3$  a ve druhém experimentu na hodnotu  $\rho_{Fe} = 11800 \text{ kg/m}^3$ . Takto můžeme ověřit, jakým způsobem zareaguje navržený fuzzy algoritmus v porovnání s původním PI řídicím systémem při zvolené skokové změně výkonové hladiny ze 100 na 50 %. Na obr. 7-5 jsou v prvním grafu zobrazeny tři průběhy teploty pro fuzzy PI regulaci pro různé dynamiky soustavy a ve druhém grafu je reakce původní PI regulace. Na obr. 7-6 jsou vzájemná porovnání reakcí fuzzy PI a původní PI regulace pro jednotlivé systémy s různou dynamikou.



**Obr. 7-5: Odezva fuzzy PI a původní PI regulace na změny dynamiky soustavy**



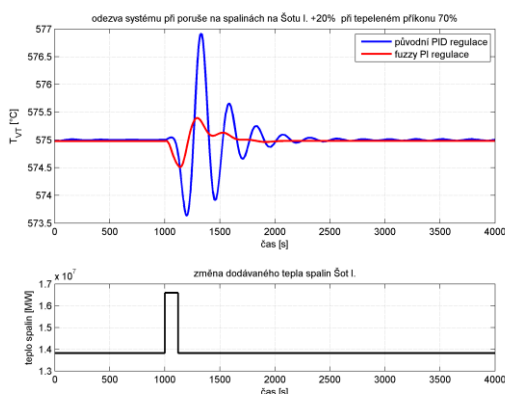
**Obr. 7-6: Porovnání fuzzy PI a původní PI regulace pro jednotlivé varianty soustavy**

Z grafů je patrné, že fuzzy PI regulační systém dokáže lépe reagovat na změnu dynamiky soustavy, nevykazuje tak velké oscilace a rychlost ustálení teploty je mnohem rychlejší než původní PI regulátory. Je možno konstatovat, že fuzzy algoritmus vykazuje vyšší robustnost při simulačních experimentech.

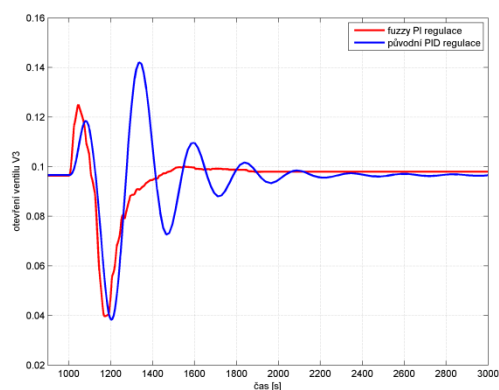
### 7.3 Ověření vlastností chování soustavy při poruše na spalínách

Dalším testem je ověření chování při poruše na spalínách. Na základě zkušeností operátorů z elektráren se právě tato porucha jeví jako významná. Tento jev nastává velmi často a dochází k němu při zamílání mlýnů, kdy je najednou uvolněno větší množství paliva, než je požadováno. Tuto situaci lze modelovat skokovou změnou dodávaného tepla do jednotlivých přehříváků. Experiment modeluje situaci, kdy systém je na konstantní výkonové hladině 70 % a v čase  $t = 1000 \text{ s}$  dojde ke skokové změně

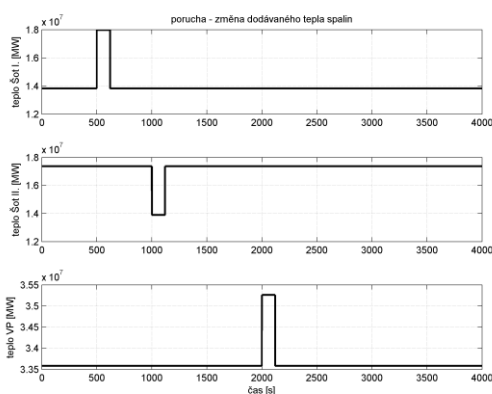
dodávaného tepla do Šoty I. o 20 % po dobu 120 s, viz obr. 7-7. Zajímavá je z hlediska regulace rychlá reakce vstřikovacího ventilu V3, viz obr. 7-8. Druhý experiment modeluje situaci, kdy nastane posloupnost poruch dodávaného tepla ze spalin na všech třech přehřívácích, viz obr. 7-9 a obr. 7-10. Z dosažených výsledků lze konstatovat, že fuzzy PI regulace se kvalitně vypořádává s poruchami typu změny dodávaného tepla ze spalin, nejcitlivěji na tyto poruchy reaguje výstupní přehřívák VP.



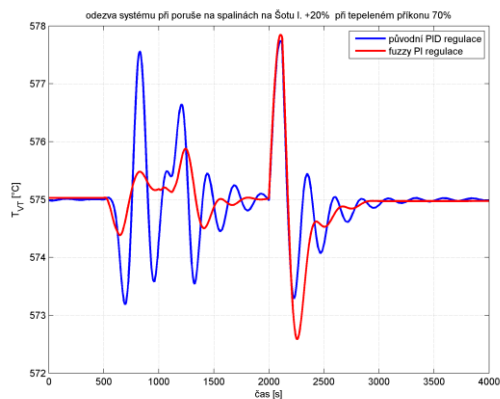
**Obr. 7-7: Porovnání fuzzy PI a původní PI regulace – změna dodávaného tepla spalin Šoty I. +20 %**



**Obr. 7-8: Reakce akčního zásahu – vstřikovacího ventilu V3 od času  $t = 1000$  s**



**Obr. 7-9: Posloupnost poruch tepla ze spalin Šoty I. +30 %, Šoty II. -20 %, VP +5 %**



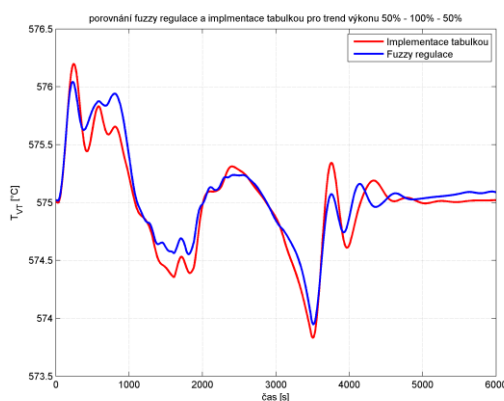
**Obr. 7-10: Porovnání fuzzy PI a původní PI regulace na posloupnost poruch tepla ze spalin**

## 7.4 Možnosti implementace fuzzy regulace

Významnou součástí využití sofistikovaných regulačních algoritmů jsou především požadavky kladené na software a hardware z hlediska výpočetních nároků

---

při jejich implementaci. Výpočetně nejnáročnější část „Fuzzy Logic Controller“ (FLC) se nahradí dvourozměrnou tabulkou, k jejichž souřadnicím je přiřazena hodnota přírůstku akčního zásahu. Porovnání průběhů regulačních pochodů v implementaci realizované tabulkou a blokem „Fuzzy Logic Controller“ je na obr. 7-11. Je možno konstatovat, že zjednodušená implementace fuzzy regulátorů dává srovnatelné výsledky s úplnou implementací.



**Obr. 7-11: Porovnání odezvy  $T_{VT}$  pro fuzzy regulaci a implementaci tabulkou**

Domnívám se, možnost zjednodušené implementace je z praktického hlediska významná. Protože cílem této disertační práce není připravit algoritmus pro implementaci pro definovaný řídicí systém, není tato část rozvedena do dalších detailů. V této disertační práci bylo pouze ukázáno na možnosti implementace a jednoduchým simulačním výpočtem bylo toto demonstrováno.

---

## 8 Shrnutí výsledků, přínos práce

### 8.1 Shrnutí výsledků

Je možno konstatovat, že v souladu se zadaným cílem disertační práce

- 1) byla navržena a optimalizována množina parametrů fuzzy regulátorů pro regulaci teploty přehřáté páry vysokotlaké části průtočného kotle. Při návrhu byl využíván jak nelineární model průtočného kotle elektrárny Pruněřov II., tak i jeho linearizace množinou lineárních modelů pro zadané výkonové hladiny. Ověření vlastností regulačních odezev bylo realizováno pomocí simulačních experimentů na nelineárním modelu s těmito závěry:
  - Porovnáme-li regulační pochody s původním PI řídicím systémem a systémem fuzzy regulátorů, viz kapitola 7.1, pak je zřejmé z obr. 7-1 až obr. 7-4, že pro simulované provozní režimy mají regulační pochody s fuzzy regulátory menší překmitý a jsou více tlumené. Zpravidla mají i kratší dobu regulace.
  - Ověření vlastností robustnosti fuzzy algoritmů, viz kapitola 7.2. Na základě simulačních experimentů se vyhodnocují vlastnosti regulačních pochodů s regulátory, které byly navrženy a optimalizovány za pomoci „jmenovitého“ modelu. Tento jmenovitý model má rozdílnou dynamiku, než má upravený simulační model, na kterém je testována odezva. I zde je možno konstatovat, že systém fuzzy regulátorů dává příznivější výsledky než původní řídicí systém. Změnu dynamiky modelů oba typy regulace překonávají, jsou stabilní, ale regulační systém s fuzzy regulátory poskytuje lépe tlumené odezvy s výrazně kratší dobou regulace, viz obr. 7-6.
  - Schopnosti fuzzy algoritmů při vyrovnání poruch na přiváděném teple je uvedena v kapitole 7.3. Regulační pochody jsou na obr. 7-7 až obr. 7-10. Porovnáme-li regulační pochody s původním řídicím systémem a fuzzy regulačním systémem, můžeme konstatovat, že i v tomto případě jsou

---

regulační pochody s fuzzy regulátory tlumenější a pokládáme je proto za vhodnější pro případné implementace.

- Přepínání regulátorů, viz disertační práce, které jsou seřizeny pro rozdílné výkonové hladiny, demonstruje ještě další možnosti zlepšování regulačních pochodů [V8], [V9].
  - Možnosti zjednodušené implementace fuzzy regulátorů jsou uvedeny v kapitole 7.4. Nahrazení výpočetně nejnáročnější části fuzzy bloku „Fuzzy Logic Controller“ dvourozměrnou tabulkou s lineární interpolací představuje výrazné zjednodušení implementace. Na obr. 7-11 je možno porovnat regulační pochody s fuzzy regulátory s kompletními bloky „Fuzzy Logic Controller“ a aproximaci dvourozměrnou tabulkou. Je vidět, že navržená aproximace dvourozměrnou tabulkou zásadně neovlivní průběh regulačních pochodů.
- 2) bylo logickou součástí práce modelování technologie. Vycházela z analýzy nelineárního stavového modelu [8], jejímž následným výstupem je pak využití fuzzy lokální sítě lineárních modelů pro ST část, viz disertační práce, a vytvoření sítě lokálně lineárních modelů pro VT část v prostředí MATLAB Simulink, viz kapitola 5.2. Realizace této sítě ve svých důsledcích umožnila časově zvládnout navržené náročné optimalizační strategie v přijatelném čase (20krát rychlejší než s nelineárním modelem) a umožnila velmi rychle dosáhnout výchozích nastavení parametrů fuzzy regulátoru.
- 3) bylo významnou součástí práce návrh struktury a optimalizačních strategií, které jsou uvedeny v kapitole 6. Jako nejvýznamnější se jeví optimalizace parametrů fuzzy regulátoru založená na minimalizačním kritériu, která je uvedena v kapitole 6.4. Jsou popsány dvě metody optimalizace parametrů, dle struktury technologie, viz kapitola 6.4.1, a podle teploty za výstupním přehřívákem, viz kapitola 6.4.2. Na obr. 6-5 až obr. 6-16 je demonstrován průběh optimalizace pro skokové a trendové změny výkonu. Z těchto obrázků je efekt optimalizace zřejmý.



---

V souhrnu je možno konstatovat, že systém regulace teplot pomocí fuzzy regulátorů dává překvapivě dobré výsledky.

## 8.2 Přínos práce

Domnívám se, že je možno přínos práce formulovat do následujících bodů:

- 1) Navržení a realizace systému fuzzy regulátorů procesu přehřevu páry průtočného kotle. Systém byl realizován v prostředí MATLAB Simulink, který ve spojení s nelineárním stavovým modelem průtočného kotle sloužil k ověření dynamických vlastností celého procesu přehřevu páry.
- 2) Ověření možnosti zjednodušené implementace fuzzy regulátorů.
- 3) Návrh a realizace množiny lokálně lineárních modelů v celém rozsahu výkonových hladin.
- 4) Nalezení algoritmu optimalizace umožňující parametrizaci fuzzy regulátorů pro regulaci vysokotlaké části procesu přehřevu páry pro:
  - postupnou optimalizaci dle struktury technologie,
  - optimalizaci podle teploty páry za výstupním přehřívákem.
- 5) Zavedení analýzy významnosti parametrů v procesu optimalizace a její využití v procesu seřizování parametrů fuzzy regulátorů. Tato metodika významným způsobem snižuje počet hledaných parametrů, a tím významně urychluje proces optimalizace.
- 6) Automatická klasifikace výsledků metodou Fuzzy Pattern klasifikace.
- 7) Simulační experimenty ukázaly na zvýšenou citlivost teploty výstupního přehříváku (VP) na poruchovou veličinu dodávaného tepla spalin.
- 8) Doplnění sofistikovaných metod a algoritmů regulace teploty přehřáté páry v průtočném kotli, které již byly na Oddělení řízení procesů na Ústavu mechatroniky a technické informatiky FM TUL studovány a řešeny, o metody fuzzy regulace.

---

## 9 Závěr

Předložená disertační práce řeší významnou problematiku regulace procesu přehřevu páry v průtočném kotli pomocí fuzzy metod regulace. V oblasti modelování navazuje na disertační práci matematického modelu průtočného kotle v [8]. Z hlediska regulace pak doplňuje aplikaci sofistikovaných algoritmů řízení, jako je robustní regulace viz [7] nebo model prediktivního řízení v [3], [4] a [5]. Práce úspěšně řeší náročný regulační problém regulované soustavy, která je vícerozměrová a silně nelineární. Změny dynamiky v různých provozních režimech vykazují změny parametrů soustavy-neurčitosti, která je ošetřena fuzzy regulátory.

Navržená a optimalizovaná soustava fuzzy regulátorů je v kaskádním zapojení. Regulační odezvy pro takto seřízené fuzzy regulátory jsou porovnávány s odezvami původního řídicího systému. Je možno konstatovat, že regulační pochody s fuzzy regulátory mají menší regulační odchylky (cca 50 %), jsou zpravidla lépe tlumené s výrazně menší dobou regulace (obr. 7-1, 50 % doba regulace). Verifikace byla provedena jak pro definované provozní režimy, tak i pro vstup poruch na dodaném tepelném výkonu včetně ověření zjednodušené implementace.

Je možno konstatovat, že cíl práce byl splněn v celém rozsahu. Navíc byla navržena a provedena optimalizační strategie parametrů regulátoru, s využitím analýzy významnosti parametrů v procesu optimalizace. Součástí práce je i zavedení klasifikace založené na fuzzy metodě.

Je třeba ale zdůraznit, že pro případné implantace je třeba hledat takovou strukturu tabulky výstupů přírůstků regulátoru, které mohou být dobře softwarově implementovatelné na daném hardwaru řídicího systému.

Závěrem je vhodné pouze připomenout, že získané průběhy regulačních pochodů, jak pro fuzzy regulační systém, tak i pro původní řídicí systém, jsou výsledkem numerických simulací na nelineárním stavovém modelu kotle. Využívaný nelineární stavový model se svými dynamickými vlastnostmi byl verifikován na provozních datech a dostatečně se přibližuje reálnému provedení kotle, viz [8].

---

## Citovaná literatura

- [1] LINDSLEY, D. *Power-plant control and instrumentation. The control of boilers and HRSG systems*. England: The Institution of Electrical Engineers, 2000. 213 s. ISBN: 0-85296-765-9.
- [2] FLYNN, D. *Thermal Power Plant. Simulation and Control*. London: The Institution of Electrical Engineers, 2003. 417 s. ISBN: 0-85296-419-6.
- [3] TATJEWSKI, P. *Advanced Control of Industrial Processes: Structures and algorithms*. London: Springer-Verlag, 2007. 107-272 s. ISBN: 978-1-84628-635-3.
- [4] CAMACHO, E. F. BORDNOS, C. *Model Predictive Control*. London: Springer-Verlag, 1999. 405 s. ISBN: 3-540-76241.
- [5] HLAVA, J.; HUBKA, L.; TŮMA, L. Modeling and predictive control of a nonlinear power plant reheater with switched dynamics, *Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2011 16th International Conference on*, s. 284-289, Miedzyzdroje. Poland, 2011. ISBN: 978-1-4577-0912-8.
- [6] PAL, B. CHAUDHURI, B. *Robust control in power systems*. New York, USA: Springer Science+Business Media, Inc., 2005. 190 s. ISBN: 978-0-387-25950-5.
- [7] MENKINA, M. *Pokročílé algoritmy řízení prvků a skupin elektrárenských bloků*. Liberec: Disertační práce. TUL, 2011.
- [8] HUBKA, L. *Vybrané modely funkčních podsystémů parního kotle*. Liberec: Disertační práce. TUL, 2010. 153 s.
- [9] BABUSKA, R.; ROUBOS, J. A.; VERBRUGGEN, H. B. Identification of MIMO systems by input-output TS fuzzy models, *Fuzzy Systems Proceedings, IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, vol. 1, s. 657-662, Anchorage. AK, 1998. ISBN: 0-7803-4863-X.
- [10] ZADEH, L., A. Fuzzy Sets, *Information and Control*, vol. 8, s. 338-353, 1965.
- [11] MAMDANI, E. H. ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Machine Studies*, vol. 7, no. 1, s. 1-13, 1975. ISSN: 0020-7373.

- 
- [12] SUGENO, M. *Industrial applications of fuzzy control*. Amsterdam, North-Holland: Elsevier Science Inc., 1985. 269 s. ISBN: 0444878297.
- [13] MISIR, D.; MALKI, H., A.; CHEN, G. Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivate controller, *Fuzzy sets and systems*, vol. 79, no. 3, s. 297-314, 1996. ISSN: 0165-0114.
- [14] LEE, C., C. Fuzzy logic in Control System: Fuzzy Logic Controller- Part I and II., *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 2, s. 404-435, 1990. ISSN: 0018-9472.
- [15] PATEL, A., V. MOHAN B. M. Analytical structures and analysis of the simplest fuzzy PI controllers, *Automatica*, vol. 38, s. 981-993, 2002. ISSN: 0005-1098.
- [16] LIU, X., J. CHAN, C., W. Neuro-Fuzzy Generalized Predictive Control of Boiler Steam Temperature, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 4, s. 900-908, 2006. ISSN: 0885-8969.
- [17] CHAIBAKHSH, A.; GHAFFARI, A.; REZAEIFAR, A. A new approach for temperature control in steam power plant, *Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on*, s. 570-575, Ajaccio, 2008. ISBN: 978-1-4244-2505-1.
- [18] SANCHEZ-LOPEZ, A.; ARROYO-FIGUEROA, G.; VILLAVICENCIO-RAMIREZ, A. Intelligent control algorithm for steam temperature regulation of thermal power plants, *Third Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, s. 754-763, Mexico, 2004. ISBN: 978-3-540-21459-5.
- [19] ISOMURSU, P. RAUMA, T. A Self-Tuning Fuzzy Logic Controller for Temperature Control of Superheated Steam, *Fuzzy Systems, IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the Third IEEE Conference on*, vol. 3, s. 1560-1563, Orlando. FL, 1994. ISBN: 0-7803-1896-X.
- [20] XIE, K.; WANG, F.; XIE, G.; LIN, T., Y. Application of Fuzzy Control Base on Changeable Universe to Superheated Steam Temperature Control System, *9th International Conference, RSFDGrC 2003*, s. 358-362, Chongqing. China, 2003. ISBN: 978-3-540-14040-5.
- [21] LIU, W.; XIE, K.; MA, H. Reheated temperature adaptive fuzzy control system of

- 
- unit, *Intelligent Control and Automation, 2002. Proceedings of the 4th World Congress on*, vol. 1, s. 391-395, Shanghai. China, 2002. ISBN: 0-7803-7268-9.
- [22] DAVIDOVÁ, O. Vliv funkce příslušnosti na průběh fuzzy regulace. *Proceedings of XXVI. Seminar ASR'2001 "Instruments and Control"*. 2001. ISBN: 80-7078-890-9.
- [23] VILIMEC, L. *Provoz a regulace energetických zařízení*. Ostrava: VŠB, 2007.
- [24] GEORGIU, T. T. On the computation of the gap metric, *System & control letters*, vol. 11, no. 4, s. 253-257, 1998. ISSN: 0167-6911.
- [25] PASSINO, K. M. YURKOVICH, S. *Fuzzy control*, 1st ed. Addison Wesley, 1997. 475 s. ISBN: 0-201-18074-X.
- [26] BOCKLISCH, S., F. BITTERLICH, N. Fuzzy Pattern Classification - Methodology and Application, s. 295-301, 1994. ISBN: 978-3-322-86825-1.

---

## Vlastní publikace

- [V1] HUBKA, L., MENKINA, M., NAHLOVSKY, T., Possibilities of the control steam generator output temperature. In *Proceedings of 9th International Carpathian Control Conference ICC'2009*. Zakopane, Poland. 2009. s. 467-470. ISBN 83-89772-51-5.
- [V2] NAHLOVSKY, T., Modelling HP Steam Generator with Fuzzy Feedforward Control System. In *Proceedings of the 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*. [CD-ROM] Vol.2. Prague: Czech Technical University in Prague, 2010. ISBN 978-80-01-04589-3.
- [V3] NAHLOVSKY, T., Linearized model of steam reheating unit realized by fuzzy nets. *METALURGIJA/METALLURGY*, vol. 49, no.2, s. 404-409. Zagreb, Croatia. April/June 2010. ISSN 0543-5846.
- [V4] OPÁLKA, J.; NAHLOVSKY, T., Continuously switched linearized models of the nonlinear once-through boiler model. In *2013 International Conference on Process Control (PC)*. IEEE, 2013, s. 263-267. ISBN 978-1-4799-0926-1.
- [V5] OPÁLKA, J.; NAHLOVSKY, T.; MODRLÁK, O., Použití modelu přehříváků k návrhu prediktivní a fuzzy regulace. *Sborník přednášek z technické konference ARaP 2013*. Praha: DIMART s.r.o., 2013, s. 75-80. ISBN 978-80-903844-5-3.
- [V6] NAHLOVSKY, T.; MENKINA, M., The comparison of standard and sophisticated algorithms on a nonlinear model of steam superheating, In *Proceedings of 4th International conference Modelling of mechanical and mechatronic systems MMaMS 2011*. Košice: Technical University of Košice, 2011., s. 323-334., ISBN 978-80-553-0731-2.
- [V7] NAHLOVSKY, T.; MENKINA, M., The Comparison of Robust and Fuzzy Control on a Trend Changes the Nonlinear Model of Steam Superheating. *Procedia Engineering*. 2012, vol. 48, s. 453-462. ISSN 1877-7058.
- [V8] NAHLOVSKY, T.; MODRLAK, O., The Fuzzy Approach to the Temperature Control of Superheated Steam. In *17th International Conference on System*

---

*Theory, Control and Computing 2013 (ICSTCC 2013) - Joint Conference Proceedings*. 11 - 13 October 2013. Sinaia, Romania. s. 374-379. ISBN 978-1-4799-2228-4.

- [V9] NAHLOVSKY, T.; MODRLAK, O., The Study of Improving the Steam Temperature Cascade Control by a Fuzzy PI Controllers Set. *20th East West Zittau Fuzzy-Kolloquium 2013*. Zittau: Rektor der Hochschule Zittau/Görlitz, 2013, s. 119-126.

Další publikace z oboru mimo téma disertační práce:

- [V10] SKOLNIK, P.; HUBKA, L.; MODRLAK, O.; NAHLOVSKY T., Cogeneration units simulation models library. In *2013 International Conference on Process Control (PC)*. IEEE, 2013, s. 252-256. ISBN 978-1-4799-0926-1.

