

# Aplikace fuzzy metod řízení pro regulaci teploty přehřáté páry

### Disertační práce

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

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



# Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum

Podpis

### Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval především mému školiteli doc. Ing. Osvaldu Modrlákovi, CSc. za cenné rady i podporu při řešení problémů práce, dále děkuji kolegům z Oddělení řízení procesů Ústavu mechatroniky a technické informatiky FM TUL za pomoc při řešení problémů práce a v neposlední řadě i své rodině za podporu a trpělivost.

Práce byla podpořena v rámci projektu Technologické agentury České republiky TA0202109 "Prediktivní řídicí systém pro zlepšení stability a zvýšení účinnosti elektrárenských bloků".

### 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 | Úv          | od           |  | 1        |
|---|-------------|--------------|--|----------|
| 2 | Sou         | učasr        | ný stav problematiky   | 3        |
|   | 2.1<br>sous | Pop<br>tavy. | pis technologického celku výroby páry v průtočném kotli, prvky regulov   | ané<br>3 |
|   | 2.2         | Sou          | učasný řídicí systém   | 5        |
|   | 2.3         | Ap           | likace fuzzy řízení v procesu přehřívání páry  | 7        |
| 3 | Cíl         | e prá        | ce, pracovní hypotézy a metody řešení  | 15       |
|   | 3.1         | Pra          | covní hypotéza a technická východiska  | 15       |
|   | 3.2         | Pož          | žadavky kladené na regulaci přehřáté páry  | 15       |
|   | 3.3         | For          | mulace cílů práce  | 16       |
| 4 | Me          | etody        | a prostředky fuzzy řízení  | 19       |
|   | 4.1         | Fuz          | zzy logika, fuzzy množiny, lingvistické proměnné   | 19       |
|   | 4.2         | Fuz          | zzy regulace – obecné rozdělení  | 19       |
|   | 4.3         | Ná           | hrada PI regulátoru za fuzzy PI regulátor  | 31       |
|   | 4.4         | Fuz          | zzy PID regulace nelineárního systému  | 39       |
|   | 4.5<br>dopř | Ná<br>edné   | hrada klasického regulačního systému vyvíječe páry za jednoduché fuzz<br>řízení                                    | y<br>40  |
|   | 4.<br>4.    | .5.1<br>.5.2 | Statická část návrhu<br>Dynamická část návrhu  | 43<br>45 |
|   | 4.6         | Fak          | ctory ovlivňující kvalitu fuzzy regulace   | 48       |
| 5 | Mc          | odelo        | vání technologického procesu vyvíječe páry   | 49       |
|   | 5.1         | Ne           | lineární model procesu výroby páry   | 50       |
|   | 5.2         | Fuz          | zzy síť lokálně lineárních modelů pro ST část  | 52       |
|   | 5.3         | Síť          | lokálně lineárních modelů pro VT část  | 61       |
| 6 | Op          | timal        | lizace parametrů fuzzy PI regulátorů   | 77       |
|   | 6.1         | For          | mulace optimalizační úlohy   | 77       |
|   | 6.2         | Str          | uktura optimalizovaných fuzzy regulátorů   | 78       |
|   | 6.3         | Str          | ategie optimalizace – pracovní hypotézy  | 79       |
|   | 6.4         | Op           | timalizace založená na maximálním využití vstupních intervalů  | 82       |
|   | 6.5         | Op           | timalizace založená na minimalizačním kritériu   | 87       |
|   | 6.<br>6.    | .5.1<br>.5.2 | Postupná optimalizace dle struktury technologie<br>Optimalizace parametrů podle teploty na výstupním přehříváku VP | 88<br>94 |

|         | 6.5<br>lin       | 5.3<br>Ieariz        | Ověření výsledků optimalizace na trendovou změnu výkonu na<br>zovaném modelu a ověření na nelineárním modelu  | 96                |
|---------|------------------|----------------------|---|-------------------|
|         | 6.6              | Klas                 | sifikace výsledků – Fuzzy Pattern klasifikace   | 100               |
|         | 6.0<br>6.0<br>Pa | 5.1<br>5.2<br>.ttern | Popis klasifikační metody<br>Analýza parametrů fuzzy PI regulátoru a souvislost s výsledky Fuzzy<br>klasifikace   | 100<br>106        |
| 7       | Sim              | ulačı                | ní experimenty  | 117               |
|         | 7.1              | Ver                  | ifikační experimenty operačních režimů na nelineárním modelu  | 117               |
|         | 7.<br>7.<br>7.   | 1.1<br>1.2<br>1.3    | Reakce na skokovou změnu tepelného výkonu ze 100 % na 50 %<br>Reakce na trendovou změnu výkonové hladiny 50 % – 100 % – 50 %<br>Reakce na trendovou změnu výkonové hladiny z 90 % na 70 % | 117<br>119<br>121 |
|         | 7.2              | Ově                  | ření vlastností chování při změně dynamiky soustavy   | 123               |
|         | 7.3              | Ově                  | ření vlastností chování soustavy při poruše na spalinách  | 125               |
|         | 7.4              | Přep                 | pínání parametrů fuzzy PI regulátoru  | 128               |
|         | 7.5              | Mož                  | žnosti implementace fuzzy regulace  | 132               |
| 8       | Shr              | nutí v               | výsledků, přínos práce  | 135               |
|         | 8.1              | Shri                 | nutí výsledků   | 135               |
|         | 8.2              | Přín                 | los práce   | 137               |
| 9       | Záv              | ĕr                   |   | 139               |
| Ci      | tovana           | á lite               | ratura  | 141               |
| V       | lastní j         | publi                | kace  | 145               |
| Př<br>m | íloha<br>aximá   | A<br>lním            | Přehled parametrů fuzzy PI regulátorů - optimalizace založená na využití vstupních intervalů  | 147               |
| Př      | íloha l          | В                    | Fuzzy Pattern klasifikace   | 151               |

| Značka  | Veličina   | Jednotka              |
|---|--|-----------------------|
| a <sub>i</sub>                                | stupeň příslušnosti i-tého ohraničeného termu v metodě COM         | -                     |
| b,c   | parametry exponenciální funkce                                     | -                     |
| de(k)   | změna regulační odchylky, první derivace regulační odchylky        | -                     |
| $d_{\scriptscriptstyle TOUT}$                 | neměřená porucha   | -                     |
| e(k)  | regulační odchylka   | -                     |
| $\ddot{e}(k)$                                 | rychlost změny regulační odchylky                                  | -                     |
| E(s)  | Laplaceův obraz regulační odchylky                                 | -                     |
| $\hat{e},\Delta\hat{e},\Delta\hat{u}_{_{PI}}$ | vstupy a výstup FLC  | -                     |
| $F_{_{yi}}$                                   | přenosová funkce   | -                     |
| J(x)  | hodnota kritéria   | -                     |
| $K_p^c$                                       | proporcionální zesílení spojitého PI regulátoru                    | -                     |
| $K_{I}^{c}$                                   | integrační zesílení spojitého PI regulátoru                        | -                     |
| $K_p^d$                                       | proporcionální zesílení číslicového PI regulátoru                  | -                     |
| $K_{I}^{d}$                                   | integrační zesílení číslicového PI regulátoru                      | -                     |
| K <sub>e</sub>                                | měřítko zesílení na vstupu $e(k)$ fuzzy regulátoru                 | -                     |
| $K_{_{\Delta e}}$                             | měřítko zesílení na vstupu $\Delta e(k)$ fuzzy regulátoru          | -                     |
| $K_{_{uPI}}$                                  | měřítko zesílení na výstupu fuzzy regulátoru                       | -                     |
| K <sub>uPI-SI-IN</sub>                        | zesílení na výstupu fuzzy regulátoru vnitřní smyčky pro<br>Šoty I. | -                     |
| K <sub>uPI-SI-OUT</sub>                       | zesílení na výstupu fuzzy regulátoru vnější smyčky pro Šoty I.     | -                     |
| $l_e, l_{\Delta e}, l_u$                      | rozsahy funkcí příslušnosti  | -                     |
| L, H  | rozsahy universa   | -                     |
| <i>m</i>                                      | hmotnostní průtok páry   | kg.s <sup>-1</sup>    |
| Ν   | čas trvání simulace  | S                     |
| р   | tlak   | Pa                    |
| p0, p1, p2                                    | parametry aproximační funkce pro klasifikaci průběhu               | -                     |
| $P(\infty)$                                   | ustálená výkonová hladina  | %                     |
| Ż   | tepelný tok  | J.s <sup>-1</sup> , W |

# Seznam symbolů

| S  | operátor Laplace-transformace  | _                  |
|--|--|--------------------|
| t  | čas  | S                  |
| Т  | vzorkovací perioda   | S                  |
| $T_{1 OUT SI}$   | teplota média na výstupní straně výměníku Šoty I.  | K                  |
| T <sub>2 OUT SII</sub>   | teplota média na výstupní straně výměníku Šoty II.   | K                  |
| $T_{3 OUT VP} \sim T_{VT}$   | teplota média na výstupní straně výměníku VP   | Κ                  |
| $T_{1 IN SI}$  | teplota média na vstupní straně výměníku Šoty I.   | K                  |
| T <sub>2 IN SII</sub>  | teplota média na vstupní straně výměníku Šoty II.  | Κ                  |
| T <sub>3 IN VP</sub>   | teplota média na vstupní straně výměníku VP  | Κ                  |
| $T_{biflx}$  | teplota média na výstupní straně bifluxu   | Κ                  |
| T <sub>mix</sub>   | teplota média za směšovacím místem $T_{mix} = T_{IN} + T_{v}$  | Κ                  |
| $T_{ST} \sim T4$   | teplota média na výstupní straně ST části  | Κ                  |
| $T_{v}$  | teplota média za vstřikem  | Κ                  |
| <i>u</i> ( <i>k</i> )  | akční veličina   | -                  |
| V1-V6  | otevření ventilu V <sub>i</sub>  | -                  |
| w(i)   | žádaná hodnota na výstupu přehříváku $i = SI, SII, VP$   | K                  |
| X  | vektor hledaných parametrů   | -                  |
| Z  | operátor Z-transformace  | -                  |
| { <i>ZV</i> , <i>ZS</i> , <i>ZM</i> ,<br><i>N</i> ,<br><i>KM</i> , <i>KS</i> , <i>KV</i> } | {Záporná Velká, Záporná Střední, Záporná Malá, Nulová,<br>Kladná Malá, Kladná Střední, Kladná Velká} - označení<br>funkcí příslušnosti | -                  |
| α  | fuzzy proměnná - automatická změna rozsahu universa  | -                  |
| $\chi_{x6}, \beta_{x6}$  | konstanty lineární funkce  | -                  |
| $\Delta e(k)$  | změna regulační odchylky, první derivace regulační odchylky  | -                  |
| $\Delta u_{PI}$  | přírůstek akční veličiny fuzzy PI regulátoru   | -                  |
| $\Delta\%$   | změna tepelného výkonu   | %                  |
| $\Delta u(k)$  | přírůstek akční veličiny   | -                  |
| $\mu_i$  | stupeň příslušnosti prvku k dané fuzzy množině   | -                  |
| $\Omega_{_{cel}}$  | aktuální výkonová hladina tepelného výkonu   | %                  |
| $ ho_{\scriptscriptstyle Fe}$  | hustota materiálu trubek výměníku  | kg.m <sup>-3</sup> |

# Seznam zkratek

| Značka   | Veličina   |
|----------|--|
| 2D, 3D   | Dvourozměrné zobrazení, Trojrozměrné zobrazení                             |
| COA      | Centre of Area – defuzzifikační metoda                                     |
| СОМ      | Centre of Maximum - defuzzifikační metoda                                  |
| DMC      | "Dynamic Matrix Control" – přístup prediktivního řízení založené na modelu |
| EPR      | Elektrárna Prunéřov II.  |
| ETU      | Elektrárna Tušimice II.  |
| FEM      | "Finite element method" – metoda konečných prvků                           |
| FLC      | Fuzzy Logic Controller   |
| F-PI-i   | Fuzzy PI regulátor   |
| FR       | Fuzzy regulace   |
| GAP      | "Gap metric" – gap metrika   |
| LOKALIMO | Software pro Fuzzy Pattern klasifikaci                                     |
| MIMO     | Multiple-input multiple-output, systém s více vstupy a výstupy             |
| MP1, MP2 | Mezipřihřívák 1, Mezipřihřívák 2   |
| MPC      | Model prediktivního řízení   |
| OP       | "Operating point" – pracovní bod systému                                   |
| P, I, D  | Proporcionální, Integrační, Derivační složka regulátoru                    |
| PD       | Proporcionálně – Derivační regulátor                                       |
| PI       | Proporcionálně – Integrační regulátor                                      |
| PID      | Proporcionálně - Integračně - Derivační regulátor                          |
| SI       | Šoty I.  |
| SII      | Šoty II.   |
| SISO     | Single-input single-output, systém s jedním vstupem a výstupem             |
| ST       | Středotlaká pára   |
| TSFM     | Takagi-Sugeno fuzzy modely   |
| VP       | Výstupní přehřívák   |
| VT       | Vysokotlaká pára   |
|          |  |

# Seznam obrázků

| Obr. 2-1: Technologické schéma výroby páry – ST a VT část                                | 4   |
|--|-----|
| Obr. 2-2: Zjednodušené blokové schéma řídicího obvodu ST části                           | 6   |
| Obr. 2-3: Zjednodušené blokové schéma řídicího obvodu VT části                           | 7   |
| Obr. 2-4: Dopředný zpětnovazební fuzzy hybridní regulační systém - struktura             |     |
| (převzato z [18])  | 9   |
| Obr. 2-5: Průběh teploty přehřáté páry - porovnání PID, Fuzzy, DMC (převzato z [19])     |     |
|  | 0   |
| Obr. 2-6: Struktura procesu přehřevu (převzato z [20])1                                  | 0   |
| Obr. 2-7: Struktura fuzzy regulátoru a jeho dva self-tuning mechanismy (převzato z [20   | )]) |
|  | 1   |
| Obr. 2-8: Výsledky simulačních experimentů (převzato z [20]) 1                           | 2   |
| Obr. 2-9: Struktura fuzzy regulátoru (převzato z [21])1                                  | 3   |
| Obr. 2-10: Automatická změna rozsahu (převzato z [21]) 1                                 | 3   |
| Obr. 4-1: Struktura fuzzy regulátoru v zapojení s regulovaným systémem2                  | 1   |
| Obr. 4-2: Nelineární charakteristika fuzzy regulátoru ( $\Delta e \sim N$ )2             | 5   |
| Obr. 4-3: Fuzzy PID regulátor – báze pravidel a) 9 pravidel, b) 25 pravidel (převzato z  |     |
| [26])  | 5   |
| Obr. 4-4: Fuzzy PID regulátor – plocha přírůstku akčních zásahů a) 9 pravidel, b) 25     |     |
| pravidel2  | 6   |
| Obr. 4-5: Základní dělení fuzzy regulátorů2  | 6   |
| Obr. 4-6: Fuzzy PID regulátor s jedním vstupem – varianta 1 v regulačním obvodu 2        | 7   |
| Obr. 4-7: Fuzzy PID regulátor s jedním vstupem – varianta 2 v regulačním obvodu 2        | 7   |
| Obr. 4-8: Fuzzy PD regulátoru s dvěma vstupy v regulačním obvodu2                        | 9   |
| Obr. 4-9: Fuzzy PI regulátor s dvěma vstupy v regulačním obvodu2                         | 9   |
| Obr. 4-10: Porovnání dvou struktur fuzzy PID regulátoru s dvěma vstupy                   | 0   |
| Obr. 4-11: Fuzzy PD+I regulátor v regulačním obvodu                                      | 0   |
| Obr. 4-12: Fuzzy PI+D regulátor v regulačním obvodu                                      | 1   |
| Obr. 4-13: Struktura fuzzy PI regulátoru   | 2   |
| Obr. 4-14: Vstupní funkce příslušnosti a) a výstupní funkce příslušnosti b) pro fuzzy PI | -   |
| regulaci   | 4   |

| Obr. 4-15: Implikace jednorozměrné závislosti                                       |
|---|
| Obr. 4-16: Fuzzy množina pro jedno pravidlo - dvě podmínky - Mamdani implikace36    |
| Obr. 4-17: Výstupní množina pro dvě pravidla a dvourozměrnou závislost              |
| Obr. 4-18: Centre of Area   |
| Obr. 4-19: Centre of Maximum  |
| Obr. 4-20: Schéma nelineární fuzzy PID regulátor40                                  |
| Obr. 4-21: Porovnání fuzzy a PID regulace nelineárního systému40                    |
| Obr. 4-22: Vazby mezi výkonovou hladinou, stavovými veličinami a nastavením ventilů |
|   |
| Obr. 4-23: Časové průběhy V244  |
| Obr. 4-24: Fuzzifikace ustálených stavů pro jednotlivé výkonové hladiny44           |
| Obr. 4-25: V2(t) pro změnu výkonu 100 % - 70 %                                      |
| Obr. 4-26: Přechod mezi 100 % - Min44   |
| Obr. 4-27: Přechod mezi Min-90-Max45  |
| Obr. 4-28: Přechod mezi Max-80-7045   |
| Obr. 4-29: $V2(t)$ – po návrhu statické části                                       |
| Obr. 4-30: Fuzzy logika se zpožďovacím členem46                                     |
| Obr. 4-31: Proložení exponenciální funkce46   |
| Obr. 4-32: Průběh akčních zásahů -Ventil 447  |
| Obr. 4-33: Průběh akčních zásahů -Ventil 547  |
| Obr. 4-34: Průběh akčních zásahů -Ventil 647  |
| Obr. 4-35: Průběh výstupní teploty Šoty II porovnání fuzzy a PI regulace47          |
| Obr. 5-1: Struktura ST části příhřevu páry53  |
| Obr. 5-2: Lineární model ST části příhřevu53  |
| Obr. 5-3: Lineární model ST části – vybraná část                                    |
| Obr. 5-4: Zvolené funkce příslušnosti pro vstup – výkonovou hladinu 70-100 %55      |
| Obr. 5-5: Metoda snižování řádu derivace a Takagi-Sugeno Fuzzy Model56              |
| Obr. 5-6: Kombinace reakcí teploty T4 pro změny výkonové hladiny v rozsahu 70-100 % |
|   |
| Obr. 5-7: Funkční závislost časové konstanty přenosové funkce na změny výkonové     |
| hladiny58   |
| Obr. 5-8: Reakce výstupní teploty na změnu $\Delta T$ , $\Delta Q$                  |

| Obr. 5-9: Reakce výstupní teploty na změnu $\Delta T$ , $\Delta Q$ , $\Delta m$ , $\Delta \%$ | 60 |
|---|----|
| Obr. 5-10: Struktura náhrady VT části modelu průtočného kotle                                 | 61 |
| Obr. 5-11: Struktura spojitě přepínaného lineárního modelu (náhrada přehříváku)               | 62 |
| Obr. 5-12: Struktura lineární náhrady přehříváku  | 63 |
| Obr. 5-13: Celková struktura lineárního modelu VT části (SI+SII+VP)                           | 66 |
| Obr. 5-14: průběh otevření ventilu <i>V1</i>  | 67 |
| Obr. 5-15: Teplota za Šoty I  | 67 |
| Obr. 5-16: Teplota za Šoty II.  | 67 |
| Obr. 5-17: Teplota za VP  | 67 |
| Obr. 5-18: Teplota za Šoty I.   | 67 |
| Obr. 5-19: Teplota za Šoty II.  | 67 |
| Obr. 5-20: Teplota za VP  | 68 |
| Obr. 5-21: Průběh otevření ventilu VI   | 68 |
| Obr. 5-22: Teplota za Šoty I.   | 68 |
| Obr. 5-23: Teplota za Šoty II.  | 68 |
| Obr. 5-24: Teplota za VP  | 68 |
| Obr. 5-25: Porovnání $T_{mix}$ – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %                          | 70 |
| Obr. 5-26: Porovnání $T_{out}$ – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %                          | 70 |
| Obr. 5-27: Porovnání $T_{mix}$ – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %                        | 71 |
| Obr. 5-28: Porovnání $T_{out}$ – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %                        | 71 |
| Obr. 5-29: Porovnání T <sub>out</sub> – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %                   | 72 |
| Obr. 5-30: Porovnání otevření ventilů – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %                   | 73 |
| Obr. 5-31: Porovnání $T_{out}$ – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %                        | 73 |
| Obr. 5-32: Porovnání otevření ventilů – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %                 | 74 |
| Obr. 6-1: Technologie VT části přehřáté páry s fuzzy PI řídicím systémem                      | 77 |
| Obr. 6-2: Struktura fuzzy PI regulátoru   | 78 |
| Obr. 6-3: Rozdělení funkcí příslušnosti   | 79 |
| Obr. 6-4: Plocha přírůstku akční veličiny pro 9x9   | 79 |
| Obr. 6-5: Reakce $T_{biflx}$ při změně výkonové hladiny ze 100 na 50 %                        | 83 |
| Obr. 6-6: Teplota $T_{VT}$ bez optimalizace   | 84 |

| Obr. 6-7: Průběh $e, \Delta e - vnitřní a vnější smyčka - Šoty I$                        |
|--|
| Obr. 6-8: Průběh $e, \Delta e - vnitřní a vnější smyčka - Šoty II$                       |
| Obr. 6-9: Průběh $e, \Delta e - vnitřní a vnější smyčka – VP$                            |
| Obr. 6-10: Porovnání původní a optimalizované nastavení fuzzy PI regulace                |
| Obr. 6-11: Optimalizace parametrů Šoty I. – odezvy teploty na výstupu Šoty I90           |
| Obr. 6-12: Optimalizace parametrů Šoty I. – odezvy teploty na výstupu Šoty II90          |
| Obr. 6-13: Optimalizace parametrů Šoty I. – odezvy teploty $T_{VT}$ na výstupu VP91      |
| Obr. 6-14: Optimalizace parametrů Šoty II. – odezvy teploty na výstupu Šoty II92         |
| Obr. 6-15: Optimalizace parametrů Šoty II. – odezvy teploty na výstupu VP92              |
| Obr. 6-16: Optimalizace parametrů VP – odezvy teploty $T_{VT}$ na výstupu VP93           |
| Obr. 6-17: Optimalizace - průběh teploty na SI95   |
| Obr. 6-18: Optimalizace - průběh teploty na SII95  |
| Obr. 6-19: Optimalizace parametrů SI, SII a VP – průběh teploty $T_{VT}$ na výstupu VP95 |
| Obr. 6-20: Optimalizace parametrů SI, SII a VP – průběh teploty $T_{VT}$ na výstupu VP – |
| trendová změna výkonu 50-100 %97   |
| Obr. 6-21: Výsledné porovnání optimalizace - odezva $T_{VT}$ na skokovou změnu výkonu    |
|  |
| Obr. 6-22: Výsledné porovnání optimalizace – odezva $T_{VT}$ na trendovou změnu výkonu   |
|  |
| Obr. 6-23: Aproximace průběhu výstupní teploty $T_{VT}$ – průběh č. 5 a č. 31102         |
| Obr. 6-24: Subjektivní posouzení nekvalitních průběhů č. 33 a č. 44103                   |
| Obr. 6-25: Rozložení závislosti parametrů aproximační funkce p0/p1103                    |
| Obr. 6-26: Rozložení závislosti parametrů aproximační funkce <i>p1/p2</i> 104            |
| Obr. 6-27: Porovnání první sady 8 průběhů104   |
| Obr. 6-28: Vyhodnocení kvality 48 experimentů pro dvě potenciální funkce105              |
| Obr. 6-29: Určení vhodné varianty třídy potenciální funkce                               |
| Obr. 6-30: Sada parametrů pro nové experimenty z č. 44 do č. 41107                       |
| Obr. 6-31: Ohodnocení nové sady 62 experimentů108  |
| Obr. 6-32: Závislost parametrů <i>IN u</i> a <i>OUT de</i> na ohodnocení kvality - 2D108 |
| Obr. 6-33: Závislost parametrů IN u a OUT de na ohodnocení kvality - 3D108               |

| Obr. 6-34: Porovnání průběhů pro různé parametry <i>IN de</i> a <i>IN e</i>             |
|---|
| Obr. 6-35: Analýza <i>IN de</i> - porovnání vlivu na oscilace                           |
| Obr. 6-36: Analýza <i>IN de</i> - porovnání vlivu na tlumení překmitu                   |
| Obr. 6-37: Analýza <i>IN u</i> - porovnání vlivu na překmit                             |
| Obr. 6-38: Analýza IN e - porovnání   |
| Obr. 6-39: Analýza <i>OUT u</i> - porovnání vlivu na velikost překmitu 113              |
| Obr. 6-40: Výsledky klasifikace 192 experimentů   |
| Obr. 6-41: Průběhy v pořadí 145-192   |
| Obr. 6-42: Průběhy v pořadí 96-144  |
| Obr. 6-43: Nejlépe hodnocené průběhy odezvy teploty $T_{VT}$                            |
| Obr. 6-44: Závislost OUT u a IN u na libovolné kombinaci IN de a IN e                   |
| Obr. 7-1: Porovnání odezvy teploty $T_{VT}$ původní PI a fuzzy PI regulace na skokovou  |
| změnu výkonové hladiny 100-50 %118  |
| Obr. 7-2: Porovnání odezvy významných měřených teplot pro původní PI a fuzzy PI         |
| regulaci při skokové změně výkonové hladiny118  |
| Obr. 7-3: Porovnání průběhů akčních zásahů – vstřikovacích ventilů V1, V2 a V3 119      |
| Obr. 7-4: Porovnání odezvy teploty $T_{VT}$ původní PI a fuzzy PI regulace na trendovou |
| změnu výkonové hladiny 50 % – 100 % – 50 % 120  |
| Obr. 7-5: Porovnání odezvy významných měřených teplot pro původní PI a fuzzy PI         |
| regulaci při trendové změně výkonové hladiny120   |
| Obr. 7-6: Porovnání průběhů akčních zásahů – poloha vstřikovacích ventilů V1, V2 a V3   |
|   |
| Obr. 7-7: Porovnání odezvy teploty $T_{VT}$ původní PI a fuzzy PI regulace na trendovou |
| změnu výkonové hladiny 90-70 %122   |
| Obr. 7-8: Porovnání průběhů akčních zásahů – poloha vstřikovacích ventilů V1, V2 a V3   |
|   |
| Obr. 7-9: Odezva fuzzy PI a původní PI regulace na změny dynamiky soustavy 124          |
| Obr. 7-10: Porovnání fuzzy PI a původní PI regulace pro jednotlivé varianty soustavy    |
|   |
| Obr. 7-11: Porovnání fuzzy PI a původní PI regulace – změna dodávaného tepla spalin     |
| Šoty I. +20 %   |

| Obr. 7-12: Reakce akčního zásahu – vstřikovacího ventilu V3 od času $t = 1000$ s120    |
|--|
| Obr. 7-13: Posloupnost poruch tepla ze spalin Šoty I. +30 %, Šoty II20 %, VP +5 %      |
|  |
| Obr. 7-14: Porovnání fuzzy PI a původní PI regulace na posloupnost poruch tepla ze     |
| spalin   |
| Obr. 7-15: Trendová změna výkonové hladiny 50 % – 100 % a odezvy jednotlivých          |
| nastavení fuzzy regulátorů130  |
| Obr. 7-16: Trendová změna výkonu z 50 % na 100 % a zpět po 18 minutách13               |
| Obr. 7-17: Porovnání přepínaných fuzzy regulátorů, jednoduchých fuzzy PI a původní     |
| PI regulace  |
| Obr. 7-18: Porovnání akčních zásahů - otevření vstřikovacích ventilů - přepínaná fuzzy |
| regulace a původní PI regulace132  |
| Obr. 7-19: Struktura náhrady FLC tabulkou13  |
| Obr. 7-20: Závislost $\Delta u(k)$ na $e(k)$ , $\Delta e(k)$ - náhrada tabulkou        |
| Obr. 7-21: Porovnání odezvy $T_{VT}$ pro fuzzy regulaci a implementaci tabulkou        |

# Seznam tabulek

| Tab. 1: Báze pravidel fuzzy regulátor (3x3) (9 pravidel)  | 23                                       |
|---|--|
| Tab. 2: Báze pravidel fuzzy regulátor (7x7) (49 pravidel)   | 24                                       |
| Tab. 3: Pravidla pro fuzzy PI regulátor   | 35                                       |
| Tab. 4: Parametry přenosové funkce pro $\Delta Q$   | 55                                       |
| Tab. 5: Parametry přenosové funkce pro $\Delta \dot{m}$   | 56                                       |
| Tab. 6: Přehled koeficientů modelu pro ŠOTY I   | 64                                       |
| Tab. 7: Přehled koeficientů modelu pro ŠOTY II  | 64                                       |
| Tab. 8: Přehled koeficientů modelu pro VP   | 64                                       |
| Tab. 9: Přehled statických parametrů pro ustálenou výkonovou hladinu  | 65                                       |
| Tab. 10: Výchozí sada parametrů z předchozí optimalizace  |  |
|   |  |
| Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko   | onu 100 -                                |
| Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko 50 %  | onu 100 -<br>96                          |
| Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko<br>50 %<br>Tab. 12: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výko  | onu 100 -<br>96<br>nu 100 -              |
| <ul> <li>Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko</li> <li>50 %</li> <li>Tab. 12: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výko</li> <li>50 %</li> </ul>  | onu 100 -<br>96<br>nu 100 -<br>98        |
| <ul> <li>Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 12: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 13: Parametry aproximačních funkcí</li> </ul>   | onu 100 -<br>96<br>nu 100 -<br>98<br>102 |
| <ul> <li>Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 12: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 13: Parametry aproximačních funkcí</li> <li>Tab. 14: Porovnání parametrů pro experiment č. 44 a č. 41</li> </ul>  | onu 100 -<br>                            |
| <ul> <li>Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 12: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 13: Parametry aproximačních funkcí</li> <li>Tab. 14: Porovnání parametrů pro experiment č. 44 a č. 41</li> <li>Tab. 15: Rozsahy parametrů pro sadu experimentů</li> </ul>   | onu 100 -<br>                            |
| <ul> <li>Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 12: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 13: Parametry aproximačních funkcí</li> <li>Tab. 14: Porovnání parametrů pro experiment č. 44 a č. 41</li> <li>Tab. 15: Rozsahy parametrů pro sadu experimentů</li> <li>Tab. 16: Porovnání parametrů pro experiment č. 33 a č. 41</li> </ul>  | onu 100 -<br>                            |
| <ul> <li>Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 12: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výko 50 %</li> <li>Tab. 13: Parametry aproximačních funkcí</li> <li>Tab. 14: Porovnání parametrů pro experiment č. 44 a č. 41</li> <li>Tab. 15: Rozsahy parametrů pro sadu experimentů</li> <li>Tab. 16: Porovnání parametrů pro experiment č. 33 a č. 41</li> <li>Tab. 17: Rozsahy parametrů pro další sadu experimentů</li> </ul> | onu 100 -<br>                            |

# 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 příhřevu a přehřevu páry. Jedná se o problematiku rozsáhlých systémů s více vstupy a výstupy (MIMO). Vzhledem k jejich složitosti je tradiční regulace řešena zpravidla jako autonomní nebo kaskádní regulace jednotlivých technologických uzlů viz [1] a [2]. Regulační systémů.

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 vstřik 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. 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.

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.

<sup>&</sup>lt;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 Prunéřov II (EPR), která právě prochází rekonstrukcí. K dispozici jsou základní technické údaje o jednotlivých výměnících, jejich uspořádání a plánovaných provozních režimech, včetně základních statických výpočtů pro páru. Tato sada údajů byla minimem pro vývoj simulačního modelu, který je použit pro návrh a testy řídicího obvodu. Jako modelový vzor slouží kotel obdobné konstrukce z Elektrárny Tušimice II. (ETU), která již rekonstrukcí prošla. Díky tomu je možné získat potřebná verifikační data. Byla snaha vytvořit takový simulační model, který odpovídá konkrétnímu technologickému celku reálného provozu a pokryje předem stanovenou oblast pracovních režimů s dostatečnou přesností. Model byl vytvořen v rámci disertační práce [**8**].

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 přihřívání a přehřívání. Na obr. 2-1 je zjednodušené schéma technologického celku vyvíjení páry. Je složen ze dvou větví (ST - středotlaká a VT – vysokotlaká), pro které je společný protiproudý tepelný výměník pára-pára (biflux), který zajišťuje energetickou výměnu mezi vysokotlakou (VT) a středotlakou (ST) párou. Jeho úkolem je zlepšení vlastností přihřívané ST páry. V technologii je začleněn na vysokotlaké části před první vstřik a na středotlaké části jako první tepelný výměník s možností regulace teploty vystupující páry obtokem.

Větev přihřáté středotlaké páry (ST) se skládá z několika oddělitelných subsystémů. První částí je protiproudový výměník (biflux), souproudé vstupní a výstupní mezipřihříváky (MP1 a MP2) tvoří druhou a třetí část. Jako regulační orgány

pro řízení teploty výstupní středotlaké páry jsou zde použity dva třícestné ventily a jeden vstřikovací ventil chladicí vody.



Obr. 2-1: Technologické schéma výroby páry – ST a VT část

Druhou větví je technologický celek přehřívání páry (VT). V ekonomizéru dochází pouze k ohřevu vody. Za ekonomizérem je buben či výparník, resp. výparník s přechodníkem, který se zařazuje do části technologie, kde mají spaliny nejvyšší teplotu. Ve výparníku dochází k fázové přeměně voda-pára. Dále jsou zde první a druhý přehřívák, které nemají předřazeny vstřiky. Z našeho pohledu jsou tyto části (ekonomizér, výparník s přechodníkem, první a druhý přehřívák) považovány za neregulované tepelné výměníky z hlediska absence vstřiků, ačkoliv v reálu se i zde nachází jiný druh regulace. Dále je včleněn biflux, který lze na VT páře řadit stále k neregulované části. Poté jsou již řazeny přehříváky. Úkolem přehříváků 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 vstřik. Řízení teploty výstupní vysokotlaké páry je zajištěno právě těmito vstřikovými ventily řazenými do oběhu v části přehříváků.

Obvyklé konstrukce používaných kotlů většinou ještě využívají mezipřihřívání páry. Pára, která ve vysokotlaké části turbíny předá svou energii na hřídel a tím ztratí teplotu i tlak, je znovu přihřátá v kotli a odvedena na středně/nízkotlakou část turbíny.

Při tvorbě rovnic a dynamických modelů jsou na všechny tyto části aplikovány stejné principy globálních energetických bilancí.

#### 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. Výsledkem pak jsou vzájemné interakce mezi jednotlivými regulačními smyčkami. Regulační obvod musí být schopen udržovat žádanou hodnotu teploty páry (případně ji měnit dle zadaného trendu) a vypořádat se s poruchovými vlivy nejrůznějších charakterů (změna dodávaného tepla, změna průtoku páry, výpadek napaječky, apod.). Současný systém řízení přehřívání i přihřívání pracuje s kaskádovou strukturou kvaziadaptivních 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. Všechny realizované regulátory jsou typu PI(D) s omezením na integraci, s horními a dolními limity výstupu a proměnnými parametry. Parametry regulátorů (jak proporcionální zesílení, tak integrační popř. derivační časová konstanta) se mění v závislosti na výkonu a okamžitém provozním stavu bloku – jsou průběžně vypočítávány a měněny. Původní systém řízení teploty přehřáté (respektive přihřáté) páry vychází ze zkušeností získaných v 60. a 70. letech na československých elektrárenských blocích 110, 200 a 500 MW. Tento systém byl v průběhu 90. let inovován dle možností číslicové řídicí techniky (využití počítačových systémů) [10]. Dlouhodobé zkušenosti s těmito řídicími algoritmy ukazují, že možnosti standardních postupů využívajících adaptivních PID regulátorů jsou již vyčerpány a další optimalizace provozu je velmi omezena a v některých případech je téměř nemožná.

Nedílnou součástí základní sady regulačních smyček všech elektrárenských bloků je proces vstřikování vody. Obecně lze říci, že dynamika tohoto procesu je relativně velmi rychlá a velký vliv mají především dynamiky čidel, dynamika servoventilu a dynamika samotné směšovací jímky. Nejprve se zaměříme na regulaci teploty přihřáté páry, kde je situace odlišná od výše konstatovaného využití vstřikování vody, protože jsou primárně sledovány odlišné cíle než ve vysokotlaké části. Z hlediska ekonomiky provozu je nevýhodné využívat vstřikování vody do přihřáté páry, a proto je

využívána především regulace obtokem vybrané části přihříváků. Technologická struktura kotle v EPR má navíc přidán protiproudý tepelný výměník (biflux) v první části přihřívání, který má sice vlastní regulační člen – obtokový ventil, nicméně je pouze ovládán na základě aktuálního tepelného výkonu kotle. Zjednodušené schéma řídicího obvodu ST části je na obr. 2-2.



Obr. 2-2: Zjednodušené blokové schéma řídicího obvodu ST části

Akčními orgány jsou tři ventily: trojcestný ventil *V4* obtoku bifluxu, trojcestný ventil *V5* obtoku vstupního přihříváku a vstřikovací ventil *V6*. Jako měřené veličiny jsou do regulační smyčky zapojeny: průtok za kotlem, teplota přihřáté páry před smíšením, teplota přihřáté páry za vstřikem, teplota přihřáté páry za kotlem a tlak přihřáté páry za kotlem.

Současný regulační obvod celého celku přihřívání páry je založen na modifikované kaskádní regulaci. Smyčka obsahuje generátor akční veličiny a rozdělení akční veličiny (distribuovaná logika) na jednotlivé akční orgány bifluxu, obtoku mezipřihříváku (MP1) a vstřiku. Rozdělení vlivu akční veličiny, která je v základu normovaná do rozsahu 0-1, je provedeno s ohledem na rychlosti a vlivy jednotlivých subsystémů. Struktura je navržena tak, aby byly postupně uvedeny do činnosti ventily bifluxu, následně ochozu první části přihříváku a nakonec vstřiku. Je voleno 10procentní překrytí působnosti.

Na obr. 2-3 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.



Obr. 2-3: Zjednodušené blokové schéma řídicího obvodu VT části

Ve vysokotlaké části pracují tři nezávislé kaskádní struktury PI(D) regulátorů pro tři řízené úseky přehřívání. Každý z těchto úseků sestává z předřazeného vstřikovacího ventilu a přehříváku, kde teploty jsou měřeny vždy na vstupu do přehříváku (účinek vstřiku) a na výstupu z přehříváku (kombinovaný účinek vstřiku a paliva). Kaskádní struktura pak ve velké smyčce vytváří žádané hodnoty teploty na vstupu do přehříváku a v malé smyčce se tato hodnota promítá do aktuálního akčního zásahu prostřednictvím akčního členu – vstřikového ventilu. Akční členy jsou staticky navrženy tak, aby na všech významných výkonových hladinách (nad cca 55 %) měly nenulový průtok. To je výhodné pro možnost regulace výstupní teploty z daného subsystému nejen směrem dolů, ale případně i nahoru.

### 2.3 Aplikace fuzzy řízení v procesu přehřívání páry

Od první úspěšně aplikované myšlenky fuzzy množin (1965) [11] k regulaci dynamických procesů (kombinace parního motoru a kotle (1974) [12]) se zvyšuje

po celém světě zájem o oblast tzv. "Fuzzy Control System Engineering". Bylo potvrzeno, že 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 v konečném důsledku vedlo k budoucímu vývoji teorie fuzzy regulace v různých aplikacích [**13**]. Většina z těchto aplikací jsou založeny na intuitivní implementaci zkušeností odborníků. V posledních letech byly zaznamenány zajímavé teoretické studie regulátorů založené na fuzzy logice.

V oblasti regulační byly vyvinuty různé typy fuzzy PID regulátorů pro SISO systémy [14], [15] a [16], 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 [17].

Oblast fuzzy řízení je široce rozpracována v různých průmyslových oblastech, ale nás samozřejmě zajímá aplikace fuzzy regulace teploty přehřáté páry. Konkrétní příklady fuzzy řízení teploty přehřáté páry jsou předmětem této kapitoly. Cílem je dokázat vhodnost a správnost výběru fuzzy regulace pro řešení regulace teploty přehřáté páry a pokusit se stanovit nový dosud nerealizovaný výzkumný směr v oblasti fuzzy regulace, který bude vycházet z dosud známých poznatků, zde prezentovaných.

Jednou z výchozí literatury pro pochopení problematiky fuzzy regulace přehřáté páry je publikace [18], kde je diskutována možnost přizpůsobení teploty přehřáté páry pro Bensonův průtočný kotel 440 MW, za pomoci zpětnovazební a dopředné fuzzy regulace. Žádané teploty na výstupech přehříváků jsou 470 a 535 °C. Dopředný fuzzy řídicí systém je schopen reagovat předem, na jakékoliv abnormální změny procesu, upravením poměru vstřiku do přehříváků. Jedná se o případ, kdy není dodržen konstantní poměr mezi průtokem paliva a napájecí vody. Dva lokální fuzzy regulátory kooperují s dopředným řízením pro eliminaci efektu neměřených poruch a regulují teplotu přehřáté páry. Vstupem do dopředného regulátoru jsou průtok napájecí vody a průtok paliva. S těmito veličinami nemůžeme v našem simulačním modelu pracovat.

Vstupem do zpětnovazebního regulátoru jsou standardně<sup>2</sup> regulační odchylka *e* a její první derivace  $\Delta e$ . Výstupem jsou změny otevření dvou vstřiků chladicí vody. Na obr. 2-4 je struktura dopředného zpětnovazebního hybridního fuzzy regulačního systému. Jedná se o sériové zapojení dvou vysokotlakých přehříváků. Na základě offline experimentů jsou zvoleny tvary (trojúhelníkové, Gaussovo rozdělení) a rozmístění funkcí příslušnosti pro dané vstupy a výstupy. Na základě zkušeností je rozhodnuto o použití v publikaci popsaných fuzzy pravidel typu "*IF-THEN*". Výsledky navrhnutého regulačního obvodu jsou porovnány s konvenčním kaskádním řídicím systémem a dokáží udržet výstupní teplotu v rozsahu 535±2,6 °C. Pro experimenty je použit matematický model založený na genetických algoritmech.



Obr. 2-4: Dopředný zpětnovazební fuzzy hybridní regulační systém - struktura (převzato z [18])

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 [**19**]. 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 regulace, konkrétně založené na lineárním modelu ve formě přechodové charakteristiky (DMC, [**3**]) a klasické konvenční PID regulaci viz obr. 2-5. 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. Myšlenka vychází ze základní teorie fuzzy logiky

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Dle teorie fuzzy řízení.

[15]. Je použito sedm funkcí příslušnosti pro definici stavů regulovaných a akčních veličin.



Obr. 2-5: Průběh teploty přehřáté páry - porovnání PID, Fuzzy, DMC (převzato z [19])

Velmi zajímavá je publikace [**20**], která popisuje charakteristický přístup řešení problémů vícerozměrové regulace, kde zavádí metodu "self-tuning", při níž dochází k modifikaci koeficientu měřítka na výstupu fuzzy regulátoru. Abychom získali fuzzy regulátor více robustní, zavádí publikace další self-tuning mechanismus, který pracuje on-line a modifikuje funkce příslušnosti množiny fuzzy pravidel na výstupu. Mechanismus zavádí fuzzy meta-pravidla. Struktura procesu přehřívání je na obr. 2-6.



Obr. 2-6: Struktura procesu přehřevu (převzato z [20])

Publikace dělí laditelné parametry do 3 skupin:

- Koeficient měřítka na vstupních a výstupních proměnných
- Funkce příslušnosti proměnných
- Množina rozhodovacích pravidel

Řízený proces je složen ze 3 mezipřehříváků, které jsou regulovány pomocí dvou samostatných vstřiků chladicí vody. Pokud proces pracuje v běžných operačních módech, je teplota regulovatelná relativně snadno. Nicméně celkem často dochází

k nepravidelným změnám parametrů procesu, jako změny tlaku napájecí vody, poruchy na zdroji paliva a vzduchu, kde již konvenční regulátory typu PI v kaskádě nemohou dobře zachytit všechny tyto situace. Struktura fuzzy regulátoru s dvěma self-tuning mechanismy je na obr. 2-7. V tomto případě se nevyužívá kaskádní struktury.





Nejprve je diskutován návrh neadaptivního fuzzy regulátoru, jehož báze pravidel je rozdělena do dvou skupin:

- Pravidla pro řízení vstřikovacího ventilu V1, kde je cílem držet teplotu v bodě B (obr. 2-6) na takové hladině, na které pozice ventilu V2 není blízko jeho extrému.
- Pravidla pro řízení ventilu V2, kde je cílem držet výstupní teplotu v bodě C blízko žádané hodnoty, jak je jen možné.

Vstupem do regulátoru jsou teploty v bodech B a C a jejich první derivace. Počet pravidel je zvolen 9 resp. 27.

V další fázi je konstruován self-tuning mechanismus. Parametry jsou nejprve laděny manuálně tak, aby regulace fungovala za normálních operačních podmínek. Cílem prvního self-tuning je automatická optimalizace parametrů koeficientů měřítka na výstupu fuzzy regulátoru. Mechanismus je založen na měření amplitud a frekvencí kmitů a zavedením čtyř vhodných meta-pravidel. Tato optimalizace ale neběží on-line, vzhledem k tomu, že nastávaly nepředvídatelné reakce fuzzy regulátoru. Proto byl zaveden ještě druhý self-tuning mechanismus a tento první byl spuštěn pouze jednou pro normální operační podmínky, dále byl mechanismus odstraněn a hodnoty měřítka byly naladěny trvale. Druhý mechanismus mění pozice některých výstupních funkcí příslušnosti určitých pravidel, které vykazují extrémní nebo nulové výstupy. Hlavní myšlenkou je tlumení kmitů odchylky teploty. Měříme regulační odchylku a její první derivaci v bodě C a za použití 11 pravidel měníme pozice funkcí příslušnosti na výstupu. Parametrizace a simulace byla provedena v prostředí APROS, žádaná teplota je 530 °C. Porovnání fuzzy regulátorů je vůči klasické PI regulaci v kaskádě. Experimenty jsou nastaveny na 5 % změnu tlaku páry, kde oba přístupy pokrývají poruchu dobře. Druhý experiment ukazuje 30 % změnu v dodávce paliva. Kaskádní PI regulace drží po dlouhou dobu teplotu kolem 1 °C pod žádanou hodnotu. Ručně laděný neadaptivní fuzzy regulátor vykazuje lepší reakci na poruchu, překmit cca 0,2 °C a tlumené kmity. S použitím self-tuning mechanismu jsou výsledky ještě lepší, viz obr. 2-8.



Obr. 2-8: Výsledky simulačních experimentů (převzato z [20])
Další publikací, která popisuje charakteristický přístup k návrhu fuzzy regulátoru při adaptaci rozmístění funkcí příslušnosti v rámci universa je [21], případně úprava báze pravidel [22]. Publikace [21] se zabývá regulací linearizovaného modelu Bensonova průtočného kotle 1900 t/h, který je aproximován přenosem vyššího řádu. To je nevýhodou tohoto článku, protože v důsledku lineárního modelu jsou relativně hladké regulační pochody bez charakteristických průběhů způsobenými nelinearitami. Základní myšlenka je založena na skutečnosti, že pro regulační odchylku a její první derivaci, jsou-li tyto hodnoty malé, je třeba jiného řízení, než při velkých hodnotách těchto veličin. Zavádí fuzzy proměnnou  $\alpha$ , pro automatické rozšíření či zmenšení rozsahu universa výstupní proměnné, viz obr. 2-10, za předpokladu zachování původních fuzzy pravidel. Na obr. 2-9 je struktura fuzzy regulátoru. Pokud jsou hodnoty vstupů, obecně označených jako x a y relativně velké, řízení rozšíří rozsah universa výstupní proměnné. Pokud jsou hodnoty vstupů relativně malé, tzn. systém je blízko žádané hodnoty, je vhodné přesnější nastavení. Rozsah výstupní proměnné je stlačován a počet fuzzy lingvistických termů se relativně zvyšuje pro zvýšení přesnosti regulace.



Obr. 2-9: Struktura fuzzy regulátoru (převzato z [21])



Obr. 2-10: Automatická změna rozsahu (převzato z [21])

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.

# 3 Cíle práce, pracovní hypotézy a metody řešení

## 3.1 Pracovní hypotéza a technická východiska

Procesu přehřívání páry je silně nelineární MIMO systém v celém výkonovém rozsahu kotle, což v původním řídicím systému vyžaduje přizpůsobování parametrů regulátoru provozním režimům. Dynamika teploty páry na výstupu z přehříváků je vysokého řádu a je komplikována přítomností významných nelinearit a dopravního zpoždění. Principiálně se jedná o řízení vícerozměrového systému pomocí decentralizovaného řízení. Výsledkem pak jsou vzájemné interakce mezi jednotlivými regulačními smyčkami.

Předkládaná práce využívá nelineárních vlastností fuzzy regulátorů, jejichž optimalizované parametry jsou již v celém výkonovém rozsahu neměnné. Optimalizace parametrů je proto zásadním požadavkem kvality regulace.

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.

## 3.2 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. Akčními zásahy jsou polohy ventilů *V1, V2 a V3,* jimiž se mění průtok chladicí vody. Teplotu páry je tedy možné pouze snižovat. Mezi poruchové veličiny patří zejména vstupní tepla spalin, dále parametry vstupní páry a chladicí vody. Měřenou poruchou je pouze teplota vstupní páry, ostatní veličiny jsou odvozovány ze znalosti aktuální velikosti výkonové hladiny kotle. Pro úplnost jsou v tab. 9 uvedeny souhrnné požadavky na dodržení ustálených hodnot vstupních a výstupních teplot do jednotlivých přehříváků a otevření jednotlivých vstřikovacích ventilů pro definované

výkonové hladiny. 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, aby se dosahovalo vyšší účinnosti procesu

## 3.3 Formulace cílů práce

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.

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. Na základě získaných výsledků a po konzultacích s provozovatelem se pak připraví implementace a její vyhodnocení pro vybrané technologické uzly. Vzhledem k časovým možnostem a k provozním předpisům není vlastní implementace fuzzy regulace na řídicím systému kotle součástí disertační práce.

V rámci výzkumného centra byla řešena kromě jiného problematika modelování komponent energetických bloků, speciálně teploty přehřáté páry. K tomuto účelu byly vytvořeny stavové nelineární modely založené na globálních bilancích [8] a [23]. Část

výsledků je aplikována v rámci komplexní obnovy elektrárny Prunéřov II. Na základě uvedeného modelu [8] je v rámci této disertační práce vyvíjen řídicí systém pro VT část přehřívání páry. Pro návrh a ověření vlastností vyvíjeného systému řízení je použit právě výše odkazovaný nelineární stavový model. Navržený řídicí systém by měl zajistit zlepšení tolerancí odchylek od žádaných hodnot, více tlumené regulační procesy přehřáté páry oproti stávajícímu řídicímu systému, který je v současné době nasazen na elektrárně Prunéřov II.

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:
  - Analýza a identifikace jednotlivých technologických uzlů přehřívání páry a provozních jednotek na základě simulačních výpočtů s nelineárním stavovým modelem.
  - Na základě identifikace definovaných technologických režimů nalezení množiny vhodných lokálně linearizovaných modelů ve tvaru přenosových funkcí.
  - 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:
  - 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:
  - 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 Fuzzy logika, fuzzy množiny, lingvistické proměnné

Pokud známe matematický popis regulovaného procesu, je podle klasické teorie řízení možné systém úspěšně regulovat. Je-li proces popsán pomocí lineárních diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty, jsou známy přímočaré metody pro návrh účinné regulace. U reálných procesů však často bývá velmi obtížné najít jejich matematický popis. Měření mohou být finančně náročná, nepřesná, zdlouhavá, není možné provést dostatečný počet měření, nebo z jiných důvodů nedávají vyhovující výsledky. Další variantou je natolik složitý systém, že je téměř nemožné navrhnout pro něj klasický regulátor. Pak se přechází k určitým zjednodušením a regulace tak může být nepřesná. V praxi takovéto procesy reguluje člověk, který ze zkušenosti ví, jak je regulovat, aniž by k tomu potřeboval znát jejich matematický popis. Na takové situace je vhodný fuzzy regulátor. Pokud je člověk schopen popsat slovně řízení procesu, pak fuzzy regulace má prostředky, jak na základě popisu regulaci uskutečnit. To umožňuje tzv. fuzzy logika, která zajišťuje převod významu slov přirozeného jazyka. Fuzzy regulátor je řídicí algoritmus, který realizuje činnost popsanou pomocí přirozeného jazyka. Fuzzy regulátory poskytují dobré výsledky a nabízejí mnohem jednodušší řešení v situacích, kdy klasické regulátory selhávají nebo se stávají nestabilními. Výhodami fuzzy regulátoru je necitlivost vůči změnám podmínek. Díky tomu není třeba měnit regulátor, i když se změní podmínky pro řízení, nebo dokonce celý proces (pokud jeho změna není nijak zásadní). Další výhodou fuzzy regulátorů je jednoduchost jejich návrhu. Tyto uvedené vlastnosti jsou důsledkem faktu, že průběh regulace je popsán v přirozeném, člověku blízkém a pochopitelném jazyce [24].

#### 4.2 Fuzzy regulace – obecné rozdělení

Fuzzy regulace (FR) je založena na teorii fuzzy (neostré) logiky. Jedná se o způsob řízení, který se blíží lidskému (expertnímu) myšlení. K přednostem fuzzy regulace patří, že vnímáním těchto neostrých hodnot posuzovaných vstupních veličin, může FR pracovat i s meziúdaji a např. omezuje kmitání a přeregulování regulované teploty. FR umožňuje řízení složitých, nelineárních regulovaných soustav, a to bez nutnosti formulace jejich matematického modelu. Regulátory založené na fuzzy logice mohou být rozčleněny do tří hlavních kategorií:

- Regulátory, ve kterých jsou použita fuzzy inference a logická pravidla typu "*IF-THEN*", bez použití přesných matematických modelů. Slouží k náhradě PID regulátorů, jejichž působení není uspokojivé – nedosahuje se rychlého ustálení bez překmitávání – diskutováno v kapitole 4.3.
- Regulátory, jejichž struktura je navržena na základě fuzzy logiky s přesnými matematickými modely. Dále je možno spolupracovat s PID regulátory za účelem zvládnutí velkých poruch.
- 3. Regulátory, které kombinují fuzzy logiku a konvenční techniky, a slouží k ladění regulačních parametrů, např. k adaptaci parametrů PID regulátorů – proporcionální zesílení, integrační nebo derivační složka může být adaptována např. dle polohy pracovního bodu pomocí fuzzy logiky – diskutováno v kapitole 4.4.

Ve všech třech kategoriích uvedených výše se regulátory založené na fuzzy logice ukázali jako velmi účinné, zejména pro regulaci systémů, které lze popsat prostým jazykem, pro komplexní systémy bez popisu exaktním matematickým modelem, vysoce nelineární systémy a systémy s výraznými neurčitostmi. Většina v dnešní době používaných fuzzy regulátorů je implementována na základě zkušeností projektanta, ne dle přesných teoretických metod. To vyvolává obavy o spolehlivost, řiditelnost a stabilitu těchto fuzzy regulátorů. Proto je důležité rozšířit metody návrhu fuzzy regulátorů pomocí přesných matematických modelů, např. odvozením fuzzy PI+D z konvenčního PI+D regulátoru [**14**], který má zaručenou stabilitu, spolehlivost a řiditelnost.

Obecná struktura fuzzy regulátorů je na obr. 4-1 a je mimo jiné tvořena třemi základními bloky, souhrnně nazývanými jako "Fuzzy Logic Controller" (FLC). V bloku fuzzifikace se převádí ostrá data, která jsou naměřena nebo zadána, na fuzzy data. Bloku fuzzifikace může předcházet blok normalizace, kde se fyzikální hodnoty naměřených či zadaných hodnot převedou na normalizovanou množinu - universum. V bloku inference, který tvoří ústřední část regulátoru, se realizuje inferenční mechanismus

z rozhodovacích pravidel, pomocí kterého získáváme ze vstupních fuzzy množin výstupní množiny. Blok defuzzifikace umožňuje přiřadit výstupní fuzzy množině určitou ostrou výstupní veličinu. Za blokem defuzzifikace může následovat blok denormalizace, kde se provede přepočet na fyzikální výstupní veličiny.



#### Obr. 4-1: Struktura fuzzy regulátoru v zapojení s regulovaným systémem

Charakteristickým znakem fuzzy řízení je možnost bezprostředního použití empirických znalostí člověka (např. operátora) o řízeném procesu. To označujeme jako bázi znalostí, kterou tvoří:

- informace o stacionárních stavech, intervalech, ve kterých se pohybují hodnoty vstupních a výstupních veličin, jejich mezní hodnoty, atd. Rozšíříme-li tato data o funkce příslušnosti všech vstupních a výstupních fuzzy množin (jak bude vysvětleno později), pak všechny tyto informace o procesu se v bázi znalostí označují jako báze dat;
- kvantitativně formulované zkušenosti včetně slovně definované strategie řízení, pomocí kterých je možno realizovat řízení, tj. generovat akční veličinu. Takto zkušeností získané strategie řízení označujeme jako bázi pravidel.

Konvenční PID regulátory jsou přednostně navrženy pro regulaci lineárních systémů a poskytují vhodnější poměr náklady/přínosy. I v dnešní době je nejvíce

průmyslových procesů regulována pomocí PID (PI, PD). Nicméně, přítomnost nelineárních efektů limituje jejich kvalitu. Vzhledem k jejich lineární struktuře nejsou tyto regulátory obvykle vhodné pro procesy vyšších řádů, s dopravním zpožděním, nelineární systémy, komplikované a neurčité systémy bez precizního matematického modelu. Konvenční PI regulátory tlumí odezvu systému a snižují regulační odchylku, ale za cenu zvýšení doby náběhu a doby ustálení, zatímco konvenční PD regulátory zlepšují tlumení a redukují maximální překmit, ale nezlepšují odezvu ustáleného stavu. Řešením by mohlo být nelineární regulátor chovající se jako PID regulátor.

První fuzzy logické regulátory implementované Mamdani [12], byly konstruovány na syntéze lingvistických výroků kvalifikované lidské obsluhy. Ačkoliv tento typ FLC aplikací byl úspěšně porovnán s klasickými regulátory, procedura návrhu je závislá na zkušenostech a znalostech obsluhy a je limitována objasňováním heuristických pravidel řízení. Aby se předešlo těmto významným potížím nebo nevýhodám závislých na zkušenostech operátorů, byla navržena zobecněná meta-pravidla [25] pro strukturu deterministických fuzzy PI, PD regulátorů pro neomezené kvantizační úrovně akčních a regulovaných měřených veličin. Pro shrnutí výše uvedeného je možné definovat, že bázi pravidel je možno vytvořit:

- a) na základě empirických znalostí obsluhy
- b) na základě obecně platných meta-pravidel

Praxe ukázala, že pro jednoduchý fuzzy regulátor typu PI, PD je možno odvodit bázi pravidel pomocí **tří základních meta-pravidel**:

**Pravidlo 1:** Jestliže regulační odchylka e(k) a její změna  $\Delta e(k)$  je nulová nebo blízká nule, pak by měl být přírůstek akční veličiny  $\Delta u(k)$  – akční zásah nulový nebo blízký nule.

**Pravidlo 2:** Jestliže regulační odchylka e(k) klesá k nule nebo se blíží nule s dostačující rychlostí, pak je vhodné také neměnit akční veličinu.

**Pravidlo 3:** Jestliže se regulační odchylka e(k) nekoriguje sama, potom je třeba akční veličinu změnit a přírůstek akčního zásahu  $\Delta u(k)$  bude nenulový. Jeho velikost a znaménko závisí na znaménku a velikosti regulační odchylky e(k) a její změny  $\Delta e(k)$ .

Obecně je logické řízení implementováno vyhodnocováním rozhodovacích pravidel v inferenčním bloku. Pro fuzzy řízení a regulaci je podmínka vyjádřena formou implikace dvou fuzzy výroků ve formě:

$$JESTLIŽE < fuzzy výrok > PAK < fuzzy výrok > IF < fuzzy výrok > THEN < fuzzy výrok > (4.1)$$

První fuzzy výrok je označován jako **ancendent** (podmínka), kde jednotlivé části jsou vázány logickými operátory, druhý fuzzy výrok je nazýván **konsekvent** (důsledek). Podle těchto metapravidel byla pro jednoduchý fuzzy regulátor typu PI (odstraňuje trvalou regulační odchylku), lingvistické proměnné a jejich hodnoty/termy sestavena báze pravidel, která je uvedena v tabulce tab. 1. Regulační odchylka je fuzzifikována třemi termy {*Z*, *N*, *K*} ~ (*Záporná, Nulová, Kladná*), případně anglický ekvivalent {*N*, *Z*, *P*} ~ (*Negative, Zero, Positive*) stejně jako změna regulační odchylky a přírůstek akčního zásahu. Celkový počet pravidel je tedy 9 a je znázorněn v tabulce tab. 1, kde je pro různé kombinace e(k),  $\Delta e(k)$  aplikací pravidla (4.1) uveden výstup přírůstku akční veličiny. Termy/funkce příslušnosti, mohou mít obecně různý tvar a umístění v universu.

Tab. 1: Báze pravidel fuzzy regulátor (3x3) (9 pravidel)

| Regulační odchylka       | e  | $\{Z, N, K\}$ |
|--------------------------|----|---------------|
| Změna regulační odchylky | Δe | $\{Z, N, K\}$ |
| Přírůstek akčního zásahu | Δu | {Z, N, K}     |

|   |   | Δe    |   |   |  |  |  |
|---|---|-------|---|---|--|--|--|
|   |   | Z N K |   |   |  |  |  |
|   | Ζ | Ζ     | Ζ | Ν |  |  |  |
| e | Ν | Ζ     | Ν | Κ |  |  |  |
|   | Κ | Ν     | Κ | Κ |  |  |  |

Velká většina jednoduchých fuzzy regulátorů má bázi pravidel založenou na použití uvedených pravidel. Báze pravidel lze snadno modifikovat pro jiný počet termů regulační odchylky a její změny. V tab. 2 je uveden příklad rozdělení universa do sedmi termů jak pro vstupy (regulační odchylka a její první derivace, tak pro výstup, změnu akční veličiny). Funkce příslušnosti jsou následující. {*ZV, ZS, ZM, N, KM, KS, KV*} ~

{Záporná Velká, Záporná Střední, Záporná Malá, Nulová, Kladná Malá, Kladná Střední, Kladná Velká}<sup>3</sup>. Tabulka je pak rozšířena a je získáno celkem 49 možných pravidel, které mají vliv na kvalitu regulace. Výstup fuzzy regulátoru generuje hodnotu přírůstku akční veličiny, která je nelineární funkcí vstupních signálů. Příklad nelineární 2D charakteristiky fuzzy regulátoru je uveden na obr. 4-2. Jedná se o případ, kdy jsou použity trojúhelníkové funkce příslušnosti, a změna regulační odchylky se pohybuje v termu *Nulový N*.

 Tab. 2: Báze pravidel fuzzy regulátor (7x7) (49 pravidel)

| Regulační odchylka       | e  | $\{ZV, ZS, ZM, N, KM, KS, KV\}$ |
|--------------------------|----|---------------------------------|
| Změna regulační odchylky | Δe | $\{ZV, ZS, ZM, N, KM, KS, KV\}$ |
| Akční zásah              | Δu | $\{ZV, ZS, ZM, N, KM, KS, KV\}$ |

|   |    | Δe |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
|   |    | ZV | ZS | ZM | Ζ  | KM | KS | KV |
|   | ZV | ZV | ZV | ZV | ZV | ZS | ZM | Ν  |
|   | ZS | ZV | ZV | ZV | ZS | ZM | ZM | KM |
|   | ZM | ZV | ZV | ZS | ZM | Ν  | KM | KS |
| e | Ζ  | ZV | ZS | ZM | Ν  | KM | KS | KV |
|   | KM | ZS | ZM | Ν  | KM | KS | KV | KV |
|   | KS | ZM | Ν  | KM | KS | KV | KV | KV |
|   | KV | Ν  | KM | KS | KV | KV | KV | KV |

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Případně anglický ekvivalent: {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} ~ {Negative Big, Negative Medium, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Medium, Positive Big}.



Obr. 4-2: Nelineární charakteristika fuzzy regulátoru ( $\Delta e \sim N$ )

Na obr. 4-3 je uvedena báze pravidel, pro fuzzy PID regulátor se a) třemi termy pro regulační odchylku a její změnu, b) pět termů pro regulační odchylku a její změnu pro trojúhelníkové funkce příslušnosti a na obr. 4-4 je zobrazena výsledná plocha přírůstku akčního zásahu, který generuje takto navržený fuzzy regulátor.



Obr. 4-3: Fuzzy PID regulátor – báze pravidel a) 9 pravidel, b) 25 pravidel (převzato z [26])



Obr. 4-4: Fuzzy PID regulátor – plocha přírůstku akčních zásahů a) 9 pravidel, b) 25 pravidel

Odvození různých struktur fuzzy regulátorů PI, PD, PI+D, PID apod. vychází z konvenčního spojitého lineárního PID regulátoru. Výsledným regulátorem je diskrétní fuzzy verze konvenčního PID regulátoru, který má stejnou lineární strukturu proporcionální, integrační, případně derivační části, ale s nekonstantním zesílením. Proporcionální, integrační a derivační zesílení jsou nelineární funkcí vstupních signálů. To je zajištěno fuzzifikační, inferenční a defuzzifikační částí fuzzy regulátorů, který obsahuje volbu funkcí příslušností apod. Možné rozdělení struktur fuzzy PID regulátorů je na obr. 4-5.



Obr. 4-5: Základní dělení fuzzy regulátorů

Příkladem fuzzy PID regulátoru s jedním vstupem může být struktura na obr. 4-6, případně varianta s vlastní fuzzy logikou pro každou větev fuzzy PID regulátoru na obr. 4-7.



Obr. 4-6: Fuzzy PID regulátor s jedním vstupem – varianta 1 v regulačním obvodu



Obr. 4-7: Fuzzy PID regulátor s jedním vstupem – varianta 2 v regulačním obvodu

Především byly zkoumány dva typy struktur fuzzy regulátorů. První z nich je tzv. "position-type" fuzzy regulátor, který **generuje akční zásah** u(k) jako nelineární funkci vstupů regulační odchylky e(k) a změny regulační odchylky  $\Delta e(k)$ , druhým je "velocity-type" fuzzy regulátor, který **generuje hodnotu přírůstku akčního zásahu**   $\Delta u(k)$  jako nelineární funkci vstupů regulační odchylky e(k) a změny regulační odchylky  $\Delta e(k)$ . První zde popsaná varianta se nazývá fuzzy PD regulátor (obr. 4-8) a druhá se nazývá fuzzy PI regulátor (obr. 4-9), kde je přírůstek akční veličiny  $\Delta u(k)$ integračním členem převeden na hodnotu akčního zásahu. Dále je možno fuzzy PI regulátory dělit na dva typy. První, který byl již zmíněn, má vstupy regulační odchylku e(k) a změnu regulační odchylky  $\Delta e(k)$ , druhá varianta zahrnuje na vstupu regulační odchylku e(k) a hodnotu akční veličiny u(k) [**27**].

Vzhledem k tomu, že fuzzy regulátory jsou založeny na znalostech lidských expertů, a jsou využívány pro neznámé či částečně neznámé systémy, jsou fuzzy PI regulátory mnohem praktičtější než fuzzy PD regulátory. Ke zlepšení relativní stability systému přispívá fuzzy PD regulátor tím, že je schopen zvýšit rychlost odezvy přechodové charakteristiky, zatímco fuzzy PI regulátor je schopen redukovat trvalou regulační odchylku. Naopak, u PD regulátorů není možné odstranit trvalou regulační odchylku pro velkou třídu systémů. Nevýhodou PI regulátorů (a také fuzzy PI regulátorů) je fakt, že poskytují nižší kvalitu v přechodové odezvě v důsledku vnitřní integrační činnosti. Zlepšení přechodové charakteristiky fuzzy PI regulátorů není snadné zejména pro systém vyššího než prvního řádu, což může být jeden z důvodů, proč se v odborné literatuře vyskytují práce se simulačními experimenty pouze s tímto typem (prvního řádu) systému. Pravidla fuzzy regulátorů jsou navržena ve fázové rovině, ve které fuzzy regulátor řídí systém v tzv. "*sliding mode*". Hranice sledování ve fázovém prostoru nesouvisí s přírůstkem akční veličiny, ale se samotnou akční veličinou, která se akumuluje následující rovnicí:

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k) \tag{4.2}$$

Proto výběr maxima variací přírůstku akční veličiny, který poskytuje uspokojivou dobu náběhu a uspokojivý maximální překmit přechodové charakteristiky, není tak snadná jako v případě, kdy se volí samotná hodnota akční veličiny.



Obr. 4-8: Fuzzy PD regulátoru s dvěma vstupy v regulačním obvodu



Obr. 4-9: Fuzzy PI regulátor s dvěma vstupy v regulačním obvodu

Jeden z přístupů jak řešit tyto složité situace, je zavedení třetího vstupu a to  $\ddot{e}(k)$ . Takto upravená struktura se nazývá fuzzy PID regulátor. Nicméně není snadné měřit aktuální hodnotu této veličiny. Nevýhody fuzzy PID regulátorů s 3D bází pravidel je složitá konstrukce z následujících důvodů:

v případě použití rychlosti změny regulační odchylky *ë(k)* jako třetího vstupu, člověk-expert těžko vnímá třetí rozměr informací, např. při řízení pohybu kromě polohy a rychlosti, vnímat i zrychlení, a proto je obtížné definovat inferenční pravidla

 3D báze pravidel může být velmi složitá při zvyšujícím se počtu kvanatizací jednotlivých vstupů, počet pravidel se zvyšuje kubicky s počtem kvanatizací.

Proto se pro fuzzy PID regulátory využívají struktury s dvěma vstupy, které jsou na obr. 4-10. Jedná se o dvě možné varianty, kde první varianta vzniká součtem fuzzy PI a fuzzy PD regulátoru. Druhý návrh fuzzy PID regulátoru má výhodu v menším počtu báze pravidel a menším počtu hledaných zesílení na vstupu.



Obr. 4-10: Porovnání dvou struktur fuzzy PID regulátoru s dvěma vstupy

Další možná struktura fuzzy regulátoru je odvozena z konvenčního lineárního PD+I regulátoru. Vychází z fuzzy PD a fuzzy I regulátoru a jejich akční zásahy jsou sečteny a formují fuzzy PD+I regulátor, viz obr. 4-11



Obr. 4-11: Fuzzy PD+I regulátor v regulačním obvodu

Podobná úvaha vede k další kombinaci fuzzy regulátoru a vytváří spojením fuzzy PI a fuzzy D regulátoru fuzzy PI+D regulátor, viz obr. 4-12. [**14**]. Fuzzy PI+D regulátor zachovává jednoduchou lineární strukturu jako jeho konvenční protějšek a zvyšuje schopnost tzv. "self-tuning" možností. Dále tato struktura zachovává základní vlastnosti a přednosti obecného PID regulátoru, ale má jednoduchou konfiguraci podobnou fuzzy PI, PD regulátorů. Zahrnuje čtyři fuzzy *"IF-THEN*" pravidla pro PI a čtyři pravidla pro D část. Základní charakteristiky navrženého řešení se liší od ostatních fuzzy a non-fuzzy PID regulátorů následovně:

- Je použita stejná lineární struktura jako konvenční PI+D regulátor, ale má nekonstantní zesílení: proporcionální, integrační a derivační zesílení jsou nelineární funkcí vstupních signálů.
- Regulátor je navržen na základě precizního matematického modelu diskrétního PI+D regulátoru, ze kterého je odvozen zákon fuzzy řízení.
- Funkce příslušnosti jsou jednoduché trojúhelníkové pouze se čtyřmi "*IF-THEN*" pravidly.



Obr. 4-12: Fuzzy PI+D regulátor v regulačním obvodu

## 4.3 Náhrada PI regulátoru za fuzzy PI regulátor

Ve své práci využívám struktury fuzzy PI regulátorů, proto je v této podkapitole rozebrána podrobněji. Podrobnější struktura fuzzy PI regulátoru je na obrázku obr. 4-13.



#### Obr. 4-13: Struktura fuzzy PI regulátoru

Výstup konvenčního spojitého PI regulátoru v s-oblasti je dán:

$$u_{PI} = (K_p^c + \frac{K_I^c}{s})E(s)$$
(4.3)

kde  $K_p^c$  a  $K_I^c$  jsou proporcionální a integrační zesílení spojitého PI regulátoru, E(s) je Laplaceův obraz regulační odchylky. Rovnice může být transformována do diskrétního prostoru aplikací bilineární transformace (4.4), kde T > 0 je vzorkovací perioda a získáme následující rovnici (4.5)

$$s = \frac{2}{T} \cdot (\frac{z-1}{z+1})$$
(4.4)

$$u_{PI}(z) = (K_p^c - \frac{K_I^c T}{2} + \frac{K_I^c T}{1 - z^{-1}})E(z)$$
(4.5)

Označme:

$$K_{p}^{d} = K_{p}^{c} - \frac{K_{I}^{c}T}{2} \ a \ K_{I}^{d} = K_{I}^{c}T \tag{4.6}$$

použitím inverzní z-transformace :

$$u_{PI}(nT) - u_{PI}(nT - T) = K_p^d [e(nT) - e(nT - T)] + K_I^d e(nT)$$
(4.7)

Vydělením rovnice (4.7) vzorkovací periodou T získáme:

$$\Delta u_{p_I}(nT) = K_p^d \Delta e(nT) + K_I^d e(nT)$$
(4.8)

kde:

$$\Delta u_{PI}(nT) = \frac{u_{PI}(nT) - u_{PI}(nT - T)}{T}$$
(4.9)

$$\Delta e(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T}$$
(4.10)

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 (4.9) můžeme přepsat do tvaru:

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + T\Delta u_{PI}(nT)$$
(4.11)

Při návrhu fuzzy PI regulátoru [14] nahradíme term  $T \Delta u_{PI}(nT)$  fuzzy akční veličinou  $K_{uPI} \Delta \hat{u}_{PI}(nT)$  tak, že:

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + K_{uPI}\Delta\hat{u}_{PI}(nT)$$
(4.12)

kde  $K_{uPI}$  je zesílení na výstupu fuzzy regulátoru. V další části se zabývám standardní procedurou návrhu fuzzy regulátorů a to fuzzifikací, inferencí a defuzzifikací, souhrnně nazývané FLC. FLC má dva vstupy:  $\hat{e}, \Delta \hat{e}$  a jeden výstup:  $\Delta \hat{u}_{PI}$  (obr. 4-13). Procesem nazývaným vstupní normalizace rozumíme transformaci měřítka, které mapuje fyzikální (ostré) hodnoty stavu procesu ( $e, \Delta e$ ) do normalizovaných oblastí ( $\hat{e}, \Delta \hat{e}$ ). Naopak výstupní denormalizace mapuje normalizovanou hodnotu přírůstku akční veličiny  $\Delta \hat{u}_{PI}$ na příslušnou fyzikální oblast  $\Delta u_{PI}$ . Měřítka ( $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPI}$ ), kterými popisujeme vstupní normalizaci a výstupní denormalizaci, mají podobnou roli jako koeficienty zesílení  $K_p^d, K_I^d$  v konvenčním PI regulátoru. Vstupy do fuzzy regulátoru  $e, \Delta e$  jsou normalizovány do  $\hat{e}, \Delta \hat{e}$  pomocí vektorových součinů [**16**]:

$$\Delta \hat{e}(nT) = K_{\Delta e} \times \Delta e(nT) , \ K_{\Delta e} = \frac{L}{l_{\Delta e}}$$
(4.13)

$$\hat{e}(nT) = K_e \times e(nT), \ K_e = \frac{L}{l_e}$$
(4.14)

kde  $e \in \langle -l_e, l_e \rangle, \Delta e \in \langle -l_{\Delta e}, l_{\Delta e} \rangle$  a  $e, \Delta e \in \langle -L, L \rangle$ . Podobně výstup  $\Delta \hat{u}_{PI}$  fuzzy regulátoru je denormalizován na  $\Delta u_{PI}$  vztahem:

$$\Delta u_{PI} = K u_{PI} \times \Delta \hat{u}_{PI} , \ K_{uPI} = \frac{l_u}{H}$$
(4.15)

kde  $\Delta u_{PI} \in \langle -l_u, l_u \rangle$  a  $\Delta u_{PI} \in \langle -H, H \rangle$ . Volba určení měřítek je zpravidla založena na heuristickém přístupu. Vstupní a výstupní funkce příslušnosti fuzzy PI regulátoru jsou na obr. 4-14.



Obr. 4-14: Vstupní funkce příslušnosti a) a výstupní funkce příslušnosti b) pro fuzzy PI regulaci

Pro popis fuzzifikační části byla zvolena trojúhelníková funkce příslušnosti a parametrický popis trojúhelníkového tvaru. Každý element množiny (ostrá měřená data) v oblasti (universu) musí korespondovat s lingvistickou proměnnou. Mapování pro proměnnou  $\hat{x}$ , kde  $\hat{x}$  odpovídá  $\hat{e}$ ,  $\Delta \hat{e}$  zobrazuje obrázek obr. 4-14. Převod ostré naměřené hodnoty zajištují dvě fuzzy množiny: *záporná x (z.x.) a kladná x (k.x.)* s funkcí příslušnosti danou stupněm příslušnosti  $\mu$ :

$$\mu_{z.x.} = \begin{cases} 1 & -L \le \hat{x} \le -l \\ \frac{l - \hat{x}}{2l} & -l \le \hat{x} \le -l \\ 0 & -l \le \hat{x} \le -L \end{cases}$$
(4.16)  
$$\mu_{k.x.} = \begin{cases} 0 & -L \le \hat{x} \le -l \\ \frac{l + \hat{x}}{2l} & -l \le \hat{x} \le -l \\ 1 & -l \le \hat{x} \le -L \end{cases}$$
(4.17)

Obdobně jsou použity funkce příslušnosti pro výstup z fuzzy regulátoru, a to záporná  $\Delta u$  (z. $\Delta u$ .), nulová  $\Delta u$  (0. $\Delta u$ .) a kladná  $\Delta u$  (k. $\Delta u$ .). Z rovnice (4.16) a (4.17) vyplývá, že  $\mu_{z.x.} + \mu_{k.x.} = 1$ . Pokud je  $\hat{x}_c$  aktuálně měřená ostrá hodnota na vstupu, pak z obr. 4-14 této hodnotě přísluší stupeň příslušnosti  $\mu_X(\hat{x}_c)$ , kde  $X \in \{z.x., k.x.\}$ .

Pro obecný fuzzy PI regulátor jsou definována báze pravidel vycházející z tab. 1 následujícími čtyřmi pravidly [14] s výše uvedenými funkcemi příslušnosti:

| Tab. 3: | Pravidla | pro fuzz | y PI | regulátor |
|---------|----------|----------|------|-----------|
|---------|----------|----------|------|-----------|

| R1: | IF | $\hat{e}(k-1)$ is <i>z.e.</i> | AND | $\Delta \hat{e}(k)$ is <i>z</i> . $\Delta e$ . | THEN | $\Delta \hat{u}_{PI}(k)$ is <i>z</i> . $\Delta u$ . |
|-----|----|-------------------------------|-----|--|------|---|
| R2: | IF | $\hat{e}(k-1)$ is <i>z.e.</i> | AND | $\Delta \hat{e}(k)$ is <i>k</i> . $\Delta e$ . | THEN | $\Delta \hat{u}_{PI}(k)$ is $0.\Delta u$            |
| R3  | IF | $\hat{e}(k-1)$ is k.e.        | AND | $\Delta \hat{e}(k)$ is <i>z</i> . $\Delta e$ . | THEN | $\Delta \hat{u}_{PI}(k)$ is $0.\Delta u$            |
| R4: | IF | $\hat{e}(k-1)$ is k.e.        | AND | $\Delta \hat{e}(k)$ is <i>k</i> . $\Delta e$ . | THEN | $\Delta \hat{u}_{PI}(k)$ is $k \Delta u$            |

Použijeme-li vztah pro regulační odchylku:

$$e = w - y \tag{4.18}$$

$$\Delta e = \dot{e} = 0 - \dot{y} = -\dot{y} \tag{4.19}$$

Formulaci těchto pravidel můžeme rozumět následovně. Uvažujeme-li pravidlo R1, podmínka *z.e.* (tj. regulační odchylka *e* je záporná) implikuje ze vztahu (4.18), že regulovaná veličina *y* systému je vyšší než žádaná hodnota *w*, a *z.* $\Delta e$ . (změna regulační odchylky ( $\Delta e$  je záporná) implikuje<sup>4</sup> z rovnice (4.19), 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  $\Delta \hat{a}_{p_I}$  záporný tj. *z.* $\Delta u$ , regulovat systém směrem dolů k žádané hodnotě. Podobně pravidlo R2 je aplikováno při situaci, kdy výstup systému je nad žádanou hodnotou, ale pohybuje se směrem dolů k žádané hodnotě, proto není třeba měnit přírůstek akční veličiny veličiny a pouze hodnotu akční veličiny udržujeme na stejné hodnotě a nastavíme  $\Delta \hat{u}_{p_I}$  na nulový přírůstek tj.  $0.\Delta u$ . Pravidla 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. Každý jednotlivý příspěvek představuje hodnotu akční veličiny vypočítané jedním pravidlem.

Pokud bychom měli v pravidle pouze jednu podmínku např. pro *e*, pak stupeň příslušnosti  $\mu(\hat{e})$  měřené "ostré" hodnoty určuje hladinu, která ořízne výstupní fuzzy množinu konsekventu  $\Delta \hat{u}_{PI}$  a tvoří tak oříznutou výstupní fuzzy množinu. Příklad implikace jednorozměrné závislosti je na obr. 4-15.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Za podmínky, že žádaná hodnota w(t) je konstantní.



Obr. 4-15: Implikace jednorozměrné závislosti

Pokud máme v našem případě v jednom pravidle více podmínek, (podmínku pro e, tak i pro  $\Delta e$ ), pak při překrytí funkcí příslušnosti v universu využitých v jednom pravidlu je provedena implikace dvourozměrné závislosti s jedním pravidlem, viz obr. 4-16. Výpočet fuzzy množin jednotlivých příspěvků vychází z logického předpokladu, že důsledek (konsekvent) může mít maximálně stupeň příslušnosti jako má podmínku (ancendent). Pak každá podmínka v ancendentu vygeneruje svou individuální výstupní fuzzy množinu, a z nich vybíráme minimum<sup>5</sup>. Tato implikace se označuje jako Mamdani implikace. Jednou z dalších možností je použití Larsenovy implikace, která je na rozdíl od Mamdani implikace, která je definována jako průnik *T*-normy, definována jako algebraický násobek *T*-normy (4.20).





Konečně jsou výsledné fuzzy množiny z každého pravidla sloučeny do množiny celkového regulačního výstupu, tedy v případě dvou pravidel určují konsekventy obou

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> V případě, že je mezi podmínkami vazba AND.

implikací jejich dílčí podíly na celkové velikosti množiny přírůstku akční veličiny, viz obr. 4-17. V našem případě použitím čtyř pravidel lze výstupní množinu definovat jako (4.21):

$$\mu_{CELK}(\Delta \hat{u}_{PI}(k)) = \max(\mu_{R1}(\Delta \hat{u}_{PI}(k)), \mu_{R2}(\Delta \hat{u}_{PI}(k)), \mu_{R3}(\Delta \hat{u}_{PI}(k)), \mu_{R4}(\Delta \hat{u}_{PI}(k))) \quad (4.21)$$



Obr. 4-17: 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. Existuje množství možných voleb defuzzifikační metody, např. "Centre of Area" (COA), která je definována vztahem:

$$\Delta \hat{u}_{PI_{COA}} = \frac{\int \mu_{CELK} (\Delta \hat{u}_{PI}) \cdot \Delta \hat{u}_{PI} \ d\Delta \hat{u}_{PI}}{\int \mu_{CELK} (\Delta \hat{u}_{PI}) \ d\Delta \hat{u}_{PI}}$$
(4.22)

která vypočítává souřadnici těžiště ohraničené plochy  $\mu_{CELK}(\Delta \hat{u}_{PI})$ , což je celková výsledná plocha výstupní fuzzy množiny, viz obr. 4-18. Tato souřadnice pak odpovídá hodnotě přírůstku akční veličiny.



**Obr. 4-18: Centre of Area** 

Další možností je použití defuzzifikační metody "Centre of Maximum" (COM), která je definována vztahem (4.23):

$$\Delta \hat{u}_{PI_{COM}} = \frac{\sum_{i=1}^{r} \alpha_i \cdot \Delta \hat{u}_{PI_i}}{\sum_{i=1}^{r} \alpha_i}$$
(4.23)

kde  $\Delta \hat{u}_{PI COM}$  je výsledná hodnota akční veličiny,  $a_i$  je stupeň příslušnosti *i*-tého ohraničeného termu,  $\Delta \hat{u}_{PI_i}$  je odpovídající souřadnice akční veličiny *i*-tého termu, viz obr. 4-19. V této metodě je nahrazena funkční závislost výstupního termu (funkce příslušnosti) typickou hodnotou  $\Delta \hat{u}_{PI_i}$ . Typickou hodnotou  $\Delta \hat{u}_{PI_i}$  je míněna numerická hodnota korespondující se stupněm příslušnosti  $a_i$  pro danou funkci příslušnosti.



**Obr. 4-19: Centre of Maximum** 

Existuje celá řada dalších metod, které poskytují trochu odlišné defuzzifikované výstupní hodnoty přírůstku akční veličiny, a proto se jejich použití volí podle druhu aplikace.

### 4.4 Fuzzy PID regulace nelineárního systému

V rámci příprav disertační práce jsem se zabýval oblastí ověřování možností fuzzy regulace na vybraných soustavách. Tato podkapitola popisuje jednu z možných metodik návrhu fuzzy logického regulátoru pro nelineární řízený systém. Návrh regulátoru vychází z klasických PID regulátorů s tím rozdílem, že P a D složka jsou v celém rozsahu konstantní, I složka je adaptována dle aktuální polohy pracovního bodu. Testovacím systémem, pro který jsem sestrojil fuzzy regulátor, je nelineární systém 3. řádu:

$$y'''+3y''+2y'+y^3 = u (4.24)$$

Pro návrh fuzzy regulátoru je na počátku použit fuzzy regulátor typu Mamdani v paralelním zapojení PI+PD, kde složky P a D jsou pomocí fuzzy logiky nastavovány v závislosti na hodnotách regulační odchylky a její první derivace dle klasické teorie o fuzzy regulátorech [28] a [14]. Integrační větev fuzzy regulátoru je však v tomto případě adaptována v závislosti jak na regulační odchylce e(t), tak na hodnotě žádané veličiny w(t) [29] viz obr. 4-20.

Ve zvolených pracovních bodech byla provedena identifikace parametrů jednotlivých klasických PID regulátorů. Pro všechny pracovní body jsou nastaveny stejné hodnoty konstant proporcionální a derivační větvě PID regulátoru. Adaptace PID regulátoru je zajištěna změnou zesílení integrační složky PID regulátoru. Integrační konstanta se mění podle polohy pracovního bodu a pro její aproximaci je určena adaptační funkce ve tvaru polynomu 2. řádu.

$$K_{I} = fce(w(t)) \tag{4.25}$$

kde w(t) je žádaná hodnota. Pak pro integrační větev regulátoru platí, že její výstup je roven:

$$u_I = K_I \cdot e(t) = fce(w(t)) \cdot e(t) \tag{4.26}$$

Dosazením do rovnice jsou získány jednotlivé výstupní hodnoty pro všechny kombinace vstupních fuzzy množin. Po zadání těchto hodnot do fuzzy bloku Takagi-Sugeno, kde vstupy jsou hodnoty e(t) a w(t), výstupem je akční veličina u integrační části, je sestrojen regulační obvod s nelineárním fuzzy regulátorem. Jemné doladění regulátoru je řešeno úpravou měřítek universa. Porovnání s klasickým PID regulátorem, který je schopen kvalitně regulovat jen v úzkém okolí jednoho pracovního bodu jednoznačně vyniká fuzzy regulátor, který v celém rozsahu žádaných hodnot poskytuje dobré výsledky regulace (obr. 4-21). Seznámení se s možnou adaptací a laděním fuzzy regulátoru na základě změny vstupních měřítek je významné pro návrhy řídicích algoritmů v elektrárenských celcích.



Obr. 4-20: Schéma nelineární fuzzy PID regulátor



Obr. 4-21: Porovnání fuzzy a PID regulace nelineárního systému

## 4.5 Náhrada klasického regulačního systému vyvíječe páry za jednoduché fuzzy dopředné řízení

Další možná varianta fuzzy regulace na vybraných soustavách, kterými jsem se zabýval v rámci příprav disertační práce, je uvedena v následujícím textu. Jedná se o jeden z prvních simulačních experimentů ověřující základní možnosti a schopnosti fuzzy logiky pro technologie pracující s přehřátou parou. Prvotním zkušebním požadavkem bylo nahradit stávající zpětnovazební řízení s PI regulátory za dopředné fuzzy ovládání s tím, že výsledná

realizace by se pochopitelně měla co nejvíce přibližovat současnému řešení. Tento základní experiment je užitečný pro analýzu i syntézu možností fuzzy řízení v konkrétní aplikaci s relativně jednoduchým, rychle dosažitelným, cílem. Koncepce experimentu je taková, že se v závislosti na aktuální výkonové hladině pomocí fuzzy logiky generují takové průběhy akčních členů, které generuje původní PI řídicí systém.

Stávající zpětnovazební regulační systém je navržen s PI(D) regulátory s proměnnými parametry v kaskádním zapojení. Jako akční veličiny máme k dispozici nastavení polohy šesti ventilů. Tento systém je relativně složitý a doplněný řadou urychlujících zpětných vazeb. Cílem je popsat možný způsob náhrady sub-optimálně nastavené zpětnovazební PI regulace za fuzzy dopředné ovládání. Princip je založen na přímé vazbě mezi hodnotou výkonové hladiny a nastavením polohy ventilů, která je aplikována skrze fuzzy logiku. Testování a experimenty probíhají na vyvinutém nelineárním simulačním modelu [**8**]. Simulované průběhy výstupních teplot jsou konfrontovány s průběhy dosažených původní zpětnovazební PI regulací.

Pro návrh alternativní formy řízení výroby páry s využitím fuzzy principů lze využít tyto způsoby:

- Parametry PI regulátorů byly nastaveny manuálně. Tyto parametry lze nastavovat pomocí fuzzy algoritmů.
- 2. PI regulátory lze nahradit přímo skrze fuzzy PI regulátory [14], [15].

V těchto případech je kaskádní struktura zachována. Další možností je využít teorie fuzzy řízení nelineárních dynamických systémů. Za předpokladu, že stávající zpětnovazební struktura je navržena optimálně, můžeme se pokusit tyto složité vazby nahradit dopředným fuzzy ovládáním a výsledná realizace má dávat podobné výsledky jako předchozí optimálně nastavené PI regulátory. Existují dvě varianty, jak tohoto cíle dosáhnout a to:

- Přes přímé fuzzy nastavování akční veličiny pomocí "IF-THEN" pravidel.
- Přes Fuzzy Pattern klasifikaci modelování s lokálními fuzzy modely [30], [31].

Tato část se zabývá bodem č. 3, který byl jedním z těžišť zahraničního pobytu na TU Chemnitz<sup>6</sup> (Spolková republika Německo) v rámci pracovní stáže programu Erasmus. Kapitola 4.3 diskutuje možnosti aplikace bodu č. 2. Postup návrhu vycházel z diskuzí s vedoucím na mé zahraniční stáži. Nicméně po zhodnocení byl tento směr vyhodnocen jako ne zcela vhodný, protože využíval pouze dopředné ovládání a postrádal zpětnou vazbu. Ale i přesto je zde postup návrhu uveden a popsán.

Jak již bylo řečeno, stávající řídicí strategie využívá kaskádní zapojení PI regulátorů s proměnnými parametry. Změna parametrů je přímo závislá na výkonu a okamžitých parametrech kotle. Této vlastnosti je využito u metody náhrady za fuzzy dopředné ovládání. K ideálnímu nastavení zpětnovazebního PI řízení se využívá informací o teplotě, tlaku, průtoku, tepla, v různých uzlech technologického systému a jejich zavedení do zpětnovazebních obvodů. Jedná se o složité struktury, protože jsou použity urychlující vazby z výstupu regulátoru na jeho vstup.

Každé výkonové hladině v rozsahu 50 – 100 % odpovídají ustálené pracovní hladiny veličin – dodávaného tepla, tlak média, průtok média, vstupní teplota a hodnota otevření regulačních ventilů, které zajišťují ustálený stav výstupních teplot. Tyto veličiny závisí na hodnotě elektrického výkonu lineárně. Druhý předpoklad je, že existuje určitá závislost mezi výkonovou hladinou a nastavením akčních zásahů, tedy otevřením ventilů, protože veličiny (teplota, tlak, průtok, teplo) ovlivňují parametry regulátorů obr. 4-22. Proto využíváme k návrhu fuzzy řízení pouze časové průběhy nastavení ventilů jako dynamické odezvy na změnu výkonové hladiny. Tyto hodnoty lze určit ze simulací na nelineárním modelu. Další měřené veličiny: tlak, průtok, teplo apod. při návrhu neuvažujeme a využíváme přímé vazby mezi výkonovou hladinou a otevřením ventilů. Vstupem do fuzzy logiky je hodnota výkonu a na výstupu generuje fuzzy logika hodnotu otevření daného ventilu. Další měřené veličiny mohou sloužit pro zpětnovazební kontrolu.

Cílem je pomocí fuzzy logiky generovat v závislosti na aktuální výkonové hladině takové průběhy akčních členů, které generuje původní PI řídicí systém.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> TU Chemnitz - Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik - Professur Systemtheorie http://www.tu-chemnitz.de/etit/systh/



K regulaci je využíváno šest ventilů a popis návrhu je přiblížen na ventilu V2. Ostatní ventily jsou navrženy obdobně.



#### 4.5.1 Statická část návrhu

Samotný návrh se skládá ze dvou částí. První je statická část. K dispozici jsou naměřené časové průběhy jednotlivých ventilů pro různé změny výkonových hladin. Na obr. 4-23 jsou průběhy ventilu V2 pro skoky výkonové hladiny ze 100 % na 90 %, ze 100 % na 80 %, ze 100 % na 70 %, a konečně ze 100 % na 60 %. Na začátku průběhu odpovídá otevření ventilu výkonové hladině 100 %, po přechodovém ději po ustálení odpovídají konce průběhů ustáleným hladinám otevření ventilů pro jednotlivé výkonové hladiny. Z grafu je patrné, že průběhy vykazují dynamické podobnosti v přechodovém ději. Každý průběh vykazuje nejprve pokles, a dále lokální maxima a minima podobných tvarů až do ustáleného stavu. Právě tyto podobnosti usnadňují fuzzy návrh. Nejdříve se určí ustálené stavy otevření ventilů po odeznění přechodového děje pro jednotlivé výkonové hladiny (100, 90, 80, 70 a 60 %). Tyto hodnoty mají ve fuzzy návrhu stupeň příslušnosti  $\mu = 1$  a tvoří střed funkce příslušnosti pro jednotlivé výkonové hladiny, viz obr. 4-24. Nejmenší otevření ventilu je pro ustálenou výkonovou hladinu odpovídající 60 %, vyšší otevření ventilu odpovídá ustálené výkonové hladině 70 %, a dále se hodnota otevření ventilu zvyšuje v sekvenci odpovídající ustáleným výkonovým hladinám 100 %, 90 % a 80 %, kde je hodnota otevření ventilu nejvyšší.





Obr. 4-24: Fuzzifikace ustálených stavů pro jednotlivé výkonové hladiny

Na obr. 4-25 je uveden příklad pro průběh otevření ventilu při změně výkonu ze 100 - 70 %. Na začátku odpovídá velikost otevření ventilu 100 % a na konci 70 %. Dalším bodem návrhu je označení dalších významných bodů v grafu. Z grafu je vidět, že v průběhu se nacházejí lokální maxima či minima. Hodnoty těchto špiček můžeme přiřadit k hodnotám výkonových hladin. Špičky jsou přiřazeny tak, aby odpovídaly hodnotám otevření ventilů pro odpovídající ustálené výkonové hladiny. V průběhu se mohou vyskytovat lokální maxima a minima.







Označením významných bodů získáme sekvenci 100–Min–90–Max–80–70, po které bude fuzzy logika přepínat. Pro přehlednost je přepínání zakresleno ve třech

následujících grafech. Nejprve jsou naznačeny funkce příslušnosti pro přechody mezi hladinou 100 % a Min (obr. 4-26). V druhém grafu je realizováno přepínání Min – 90 – Max (obr. 4-27), v posledním obrázku (obr. 4-28) jsou naznačeny přechody mezi Max – 80 – 70 %. Dalším krokem je určení typu funkce příslušnosti. Lze zvolit funkce trojúhelníkové, lichoběžníkové nebo Gaussovo rozložení. V našem modelu jsou zvoleny funkce příslušnosti typu trojúhelníkové funkce. Po namodelování této části je při změně výkonové hladiny ze 100 % na 70 % generován na výstupu fuzzy ovládání průběh otevírání ventilu *V2*, viz obr. 4-29. Tento průběh souhlasí ve statické části, ale modelovanému průběhu neodpovídá dynamická část, viz porovnání s obr. 4-25.





Obr. 4-27: Přechod mezi Min-90-Max

Obr. 4-28: Přechod mezi Max-80-70



Obr. 4-29: V2(t) – po návrhu statické části

#### 4.5.2 Dynamická část návrhu

Vzhledem k tomu, že se hodnota otevření ventilu má nastavovat podle aktuální výkonové hladiny, je potřeba při návrhu modelovat ještě jednu část. Při požadované změně výkonové hladiny dojde k jejímu přepnutí velmi rychle. Přibližně po t = 100 s.

Proto i reakce na výstupu fuzzy ovládání bude velmi rychlá. V reálných procesech vzhledem k rozsáhlosti technologického celku dochází ke zpoždění a odezva celého komplexního systému je pomalejší v řádech tisíců sekund. Proto potřebujeme při návrhu uvažovat druhou část, která zajistí i dynamiku procesu. Mezi výkonovou hladinu a fuzzy vstup vložíme zpožďovací člen s minimálně jednou dominantní časovou konstantou – exponenciální funkci, viz obr. 4-30. Člen zajišťuje zpomalení přepínání výkonových hladin tak, aby odpovídalo reálnému stavu. Z obr. 4-25 získáme tabulku dat, kde hodnotám výkonu přiřadíme odpovídající čas. Exponenciální funkce je v tomto tvaru:

$$hladina\_vykonu = b \cdot \exp^{-c \cdot t} + konst.$$

$$(4.27)$$

Na základě tabulky jsou parametry *b*, *c* exponenciální funkce vypočítány pomocí metody nejmenších čtverců. Proložení bodů exponenciální funkcí je uvedeno viz obr. 4-31.



Obr. 4-30: Fuzzy logika se zpožďovacím členem Obr. 4-31: Proložení exponenciální funkce

Takto navržený model dopředného fuzzy ovládání je konfrontován s výsledky dosaženými klasickou PI regulací. Na obr. 4-32 je porovnání průběhu nastavení ventilu *V4* z PI regulace s fuzzy dopředným ovládáním. Na obr. 4-33 a obr. 4-34 jsou zobrazeny průběhy ostatních ventilů pro různé možnosti fuzzy nastavení. Změny jsou v použití jiných defuzzifikačních metod nebo jiné označení výkonových hladin v průběhu (nemusí být pouze v lokálních extrémech), (červená barva označuje původní PI regulaci). Při použití fuzzy dopředného ovládání dosahujeme lepšího průběhu pro





Obr. 4-32: Průběh akčních zásahů -Ventil 4







Obr. 4-34: Průběh akčních zásahů -Ventil 6

Obr. 4-35: Průběh výstupní teploty Šoty II. - porovnání fuzzy a PI regulace

V této kapitole byly popsány možnosti modelování fuzzy dopředného ovládání, kdy se dosahuje zjednodušení struktury řízení, které je závislé pouze na hodnotě výkonové hladiny **[V2]**. Uvedené grafy jasně prokazují, že náhrada PI regulátorů za fuzzy dopředné ovládání je možná a lze dosáhnout podobných průběhů, kterých je dosaženo stávajícím řídicím systémem. Vzhledem ke koncepci, ale samozřejmě chybí odolnost vůči poruchovým vlivům, která se získá zavedením zpětné vazby, a tím tedy i změnou fuzzy ovládání ve fuzzy řízení. Nejen na základě tohoto experimentu bylo potvrzeno, že je možné pomocí fuzzy logiky pracovat s technologií přehřáté páry.

výstupní teplotu  $T_{VT}$  VT části příhřevu páry (obr. 4-35). Volbou jiných sekvencí

přepínání výkonových hladin lze dosáhnout zlepšení výsledků.

Numerické experimenty potvrdily, že je nutno i u fuzzy regulátorů pracovat se zpětnovazební strukturou řízení v technologii procesu přehřívání páry. Dopředná fuzzy regulace není pro řešení daného cíle akceptovatelná!

## 4.6 Faktory ovlivňující kvalitu fuzzy regulace

Jedním z nejdůležitějších bodů je výzkum faktorů, které ovlivňují fuzzy regulaci. Odezvy regulačních obvodů s fuzzy regulátorem závisí na bázi rozhodovacích pravidel a na bázi dat. Součástí návrhu fuzzy regulátoru je získání či vytvoření báze rozhodovacích pravidel a zadání funkcí příslušnosti pro jednotlivé vstupní a výstupní proměnné, včetně volby metod fuzzifikace a defuzzifikace. Na kvalitu regulace tedy má:

- 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 [**32**] je zajímavý pohled na vliv funkcí příslušnosti na průběh fuzzy regulace. Je zřejmé, že na dynamiku regulačních pochodů má vliv celá řada parametrů, jejichž účinky na dynamiku soustavy lze jen těžko odhadnout. Z těchto důvodů je nastavení všech hledaných parametrů pokládáno za velmi obtížné. Volba měřítek universa  $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPl}$  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  $K_{uPl}$ měníme měřítka na výstupu. Principem je najít takové hodnoty měřítek, aby hodnoty vstupující do FLC byly transformovány tak, aby se využil celý rozsah universa, pro který je FLC navržen.
## 5 Modelování technologického procesu vyvíječe páry

V této kapitole je popis metod návrhu dvou variant použitých modelů, a to nelineárního a lineárního modelu. Oprávněně může zaznít otázka, proč potřebujeme ve své podstatě dva modely? Výchozí stav je takový, že technologie je aktuálně nedostupná a nedostupnou pro jakékoli pokusy zůstane. Pokud chceme otestovat, jestli je algoritmus řízení daného úseku korektní a může být uvažováno o nasazení na reálné zařízení, pak je nejjednodušší cestou vytvořit dostatečně přesný model zařízení, v našem případě nelineární stavový simulační model technologie výroby páry. Následuje další otázka, proč budovat zcela základní lineární model, když máme k dispozici jeho nelineární variantu? Důvodem je výpočetní rychlost a dále také fakt, že většina algoritmů řízení je připravena pracovat s lineárním modelem. To je jedním z důvodů, proč nakonec používáme model nelineární i jeho po částech linearizovanou alternativu. Dále uvedu několik dalších důvodů.

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 model procesu výroby páry. Stručný popis je uveden v kapitole 5.1. V prostředí MATLAB je vytvořen plně nelineární model na principu rozložených parametrů v prostoru. Jedná se o velmi přesný a komplexní model, věrně popisující dynamiku i statiku technologického procesu. Nicméně právě k jeho komplexnosti je jeho běh relativně časově náročný. Doba výpočtů simulací ve spojení s regulačním obvodem může být při složitosti tohoto nelineárního modelu 30-45 min.

Pro návrh a verifikaci řídicích algoritmů je vhodnější alternativou použít lineární model, na kterém se dá lépe provádět prvotní syntéza regulačních algoritmů. Nevýhodou lineárních modelů je, že takový model je poté používán v úzkém okolí zvoleného pracovního bodu, neumožňuje provádět experimenty, kde probíhají větší změny výkonových hladin či okrajových podmínek, a částečně zkresluje dynamiku soustavy. Další nevýhodou je fakt, že model je konstruován jako přírůstkový a simulace by se měla provádět na modelu pracujícím v reálných parametrech. Nicméně i to je

řešitelné a vazba na reálné parametry je možná prostřednictvím zpětného posunu. Aby mohl být takový model použitelný v širokém rozmezí výkonového rozsahu, existuje možnost vytvoření sady lineárních modelů, kde každý jednotlivý model pracuje v úzkém okolí svého pracovního bodu a mezi jednotlivými lokálními modely je zajištěno jejich přepínání. Dalším důvodem, proč vytvořit v modelované technologii v celém jejím pracovním rozsahu posloupnost vhodných lineárních modelů, je uplatnit tyto modely pro sestavení odpovídajících regulátorů a regulačních algoritmů. Pomocí přepínání mezi jednotlivými modely a regulátory se pak dosáhne velmi kvalitních regulačních pochodů. Proto jsem se rozhodl vytvořit síť lokálně linearizovaných modelů, jejichž návrh je diskutován v kapitole 5.2 a kapitole 5.3.

### 5.1 Nelineární model procesu výroby páry

Tato podkapitola stručně popisuje nelineární model technologického celku vyvíječe páry, který je převzatý z [8]. Vzhledem k tomu, že jsem tento model nenavrhnul, ale používal ho a bez jeho znalosti a pochopení bych nemohl pracovat na tématu mé disertační práce, omezím se na obecné shrnutí.

Velmi důležitá součást inženýrských aplikací je modelování systémů. Simulace mohou sehrát klíčovou roli při řešení otázek týkajících se použitelnosti, účinnosti, statických a dynamických vlastností či výskytu hazardů daného zařízení ještě před jeho fyzickou konstrukcí. Velmi významná je i role modelu při návrhu a verifikaci řídicích algoritmů. Tyto faktory vedly k diskuzi o možnostech vytvoření modelu technologického celku vyvíječe páry, který by umožnil zkoumat vlastnosti systému, a dále by byl schopen propojení s modely řídicích algoritmů. V této fázi existuje několik možností, jak takový model navrhnout.

Lze využít metody konečných prvků (FEM). V případě, že použití modelu je cíleno na řízení, je tento postup zbytečně podrobný a výpočetně náročný stejně jako samotná FEM, kde je i velmi obtížné až nemožné rozumně implementovat řídicí algoritmy a provádět jejich vývoj. Proto byl zvolen přístup na principu stavového nelineárního modelu, který je podle potřeby konstruován a modelován buď na základě bilančních rovnic pro médium, nebo jako soustava se soustředěnými parametry (globální přístup), anebo jako soustava s rozloženými parametry. Použití takového přístupu je funkční a aplikovatelné pro verifikaci, optimalizaci, případně i pro vývoj a testování nových řídicích algoritmů zcela ideální, a to jak po stránce statické i dynamické přesnosti.

Matematicko-fyzikální analýza pro popis použitý pro dynamický model vychází z koncepce stavového popisu. Jako základní stavební kámen matematicko-fyzikální analýzy, která je založena na stavovém popisu, jsou použity Eulerovy rovnice neizotermního systému pro jednodimenzionální proudění trubkou v podobě třech základních bilancí. Je volen popis pomocí bilančních rovnic neizotermního systému v diferenciálním tvaru [33], [34], [35]. Tyto bilance jsou vyčíslovány na průtocích (zákon zachování hmoty), na energiích (zákon zachování energie, termodynamické věty) a na hybnostech. Jako stavové veličiny popisu (modelu) se pak obvykle volí dvojice tlak – teplota či tlak – entalpie dle toho, která je na popis vhodnější. Pro dosažení co nejreálnějších výsledků a zároveň nastolení jistého komfortu při tvorbě simulačních schémat i samotných rovnic jsou implementovány vlastnosti přihřáté/přehřáté páry ze standardních tabulek [33] do simulačního prostředí MATLAB, v němž jsou všechny modely tvořeny. Dále je pro přesný výpočet některých částí, kde dochází k radikálním změnám na některém parametru (výparník), použit model s rozloženými parametry diskretizovaný v prostoru, který dostatečně věrně popisuje dynamiku těchto simulačně nejsložitějších a tím i výpočetně nejnáročnějších částí průtočného kotle. Výsledný simulační model je tvořen s cílem dosáhnout maximální přesnosti ve statice, uspokojivé přesnosti v dynamice a rozumné výpočetní nároky.

Ukázalo se, že tepelné výměníky v kotli lze při vhodně konstruovaném modelu reprezentovat všechny jedním a tím samým simulačním modelem, pouze jinak parametrizovaným (výjimkou může, ale nemusí, být výparník). Fakt, že postačuje jeden simulační model, usnadňuje jeho samotný návrh i následnou práci s ním.

Model každého tepelného výměníku v oblasti přehřívání je konstruován jako dva (resp. tři) samostatné funkční bloky. Prvním blokem je samotný tepelný výměník, druhým blokem je pak vstřik a směšování. V oblasti ST části jsou tři akční orgány, z pohledu stavby modelu je však největším rozdílem, že dva z akčních orgánů jsou trojcestné obtokové ventily. Důsledkem toho je potřeba sestavit model i pro akční orgán trojcestného obtokového ventilu, stejně jako pro následné směšování páry z obtoku. Výsledkem je vysoce použitelný komplexní model, vhodný pro ověření nových řídicích algoritmů, ale jeho nevýhodou je vzhledem k jeho komplexnosti rychlost. Matematicko-fyzikální analýza jednotlivých částí a podrobný popis teplotní dynamiky páry přehříváků i dalších částí průtočného kotle jsou v [**8**] a [**36**].

### 5.2 Fuzzy síť lokálně lineárních modelů pro ST část

V rámci rozpracování disertační práce jsem se zabýval i oblastí identifikace stávajícího nelineárního modelu a na základě získaných přenosových funkcí vytvoření fuzzy sítě lineárních modelů. Proto jsou testovány Takagi-Sugeno fuzzy modely (TSFM) [**37**], umožňující vytvořit síť lokálně lineárních modelů. Oproti standardním fuzzy systémům typu Mamdani [**12**] je výstup TSFM roven funkci vstupních proměnných nebo konstantní hodnotě (5.1). TSFM využívá pravidla typu "*IF-THEN*" jako Mamdani.

Příklad pravidla:

*IF* input1 is A and input2 is B THEN  $output_i = p*input1 + q*input2 + r$ nebo:*IF* input1 is A and input2 is B THEN  $output_i = k$  (5.1)

Výstup získáme z rovnice (5.2):

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{R} output_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^{R} \mu_i}$$
(5.2)

kde  $\mu_i$  je funkce příslušnosti. Této vlastnosti se využívá při návrhu linearizovaného modelu. První varianta návrhu fuzzy sítě linearizovaných modelů je realizována na ST části příhřevu páry (obr. 5-1). Lineární model technologického celku příhřevu páry má následující strukturu (obr. 5-2). Vstupními parametry jsou třícestné ventily  $u_1$ ,  $u_2$ a vstřikovací ventil  $u_3$ , dále T - Teplota, p - Tlak,  $\dot{m}$  - Průtok, Q - Teplo a  $\Delta$ % - změna výkonové hladiny. Pro každou výkonovou hladinu v rozsahu 70 % až 100 % jsou generovány pracovní hladiny všech vstupních parametrů, které zajišťují ustálený stav výstupní teploty  $T_{ST}$ . Veličiny T, p, $\dot{m}$ ,Q vstupují do procesu a jejich změny lze považovat za poruchové veličiny. Přenosovým funkcím  $F_{yi}$  odpovídají změny vstupních parametrů od hladiny pracovního bodu. Jsou obecně *n*-tého řádu s různými časovými konstantami a zesíleními. Vstupem do TSFM je změna výkonové hladiny a změny vstupních parametrů  $\Delta(u_1, u_2, u_3, T, Q, \dot{m}, p)$ , na výstupu modelu jsou generovány časové konstanty a zesílení daných přenosových funkcí. Existují možnosti využít analytickou nebo numerickou linearizaci modelu za pomoci nástrojů MATLAB, nicméně zde bylo snahou simulovat situaci, kdy bychom měli k dispozici pouze reálné zařízení a nikoliv model. V následující části je popsáno, jak získat dílčí linearizované modely na základě identifikace nelineárního modelu a dále sestavení TSFM modelů, které umožňují přepínání mezi těmito přenosovými funkcemi.



Obr. 5-1: Struktura ST části příhřevu páry



Obr. 5-2: Lineární model ST části příhřevu

Pro ověření byla vybrána pouze část technologického celku příhřevu páry, konkrétně vazba od teploty  $T_1$  k teplotě  $T_{ST} \sim T_4$  (obr. 5-1) a tři vstupní parametry, které se mohou měnit, konkrétně  $\Delta T$ ,  $\Delta Q$ ,  $\Delta \dot{m}$  (obr. 5-3).



Obr. 5-3: Lineární model ST části – vybraná část

Návrh má tři fáze:

- výpočet přenosových funkcí  $F_{yi}$  při změně vstupních parametrů  $T, Q, \dot{m}$ na základě identifikace nelineárního modelu
- výpočet přenosových funkcí pro přechod mezi výkonovými hladinami
- sestavení TSFM modelů.

Identifikace změny tepla Q je provedena pro výkonové hladiny 70, 80, 90 a 100 %. Vstupní parametry jsou nastaveny na pracovní hladinu v dané výkonové hladině. Na teplu Q je provedena skoková změna  $\Delta Q \pm 5$  % v čase t. Pro každou výkonovou hladinu bylo ověřeno, že vliv jakkoli velké změny  $\Delta Q$  na výstupní teplotu  $T_4$  je lineární a proto není třeba dělat další identifikační měření pro jiné skokové změny. Vstupem TSFM je pak pouze hodnota výkonové hladiny v rozsahu 70 - 100 %. Ta je rozdělena pomocí čtyř trojúhelníkových funkcí příslušností dle obr. 5-4.



Obr. 5-4: Zvolené funkce příslušnosti pro vstup – výkonovou hladinu 70-100 %

Na základě identifikačního měření se přenosová funkce volí ve tvaru:

$$F_{yQ_i} = \frac{K}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)}$$
(5.3)

Parametry přenosové funkce dopočítané z identifikace jsou uvedeny v tabulce tab. 4. Na základě tab. 4 jsou použita 4 pravidla pro TSFM. Příklad pravidla:

*IF vykonova*\_hladina = 70 *THEN*  
$$K = 4,22E - 06$$
 and  $T1 = 212,61$  and  $T2 = 47,33$  (5.4)

Tab. 4: Parametry přenosové funkce pro  $\Delta Q$ 

|         | Parametry přenosové funkce |                    |                    |  |  |  |  |  |  |
|---------|----------------------------|--------------------|--------------------|--|--|--|--|--|--|
| výkon % | K                          | T <sub>1</sub> [s] | T <sub>2</sub> [s] |  |  |  |  |  |  |
| 70      | 4,22E-06                   | 212,61             | 47,33              |  |  |  |  |  |  |
| 80      | 3,74E-06                   | 189,81             | 42,54              |  |  |  |  |  |  |
| 90      | 3,29E-06                   | 166,41             | 36,82              |  |  |  |  |  |  |
| 100     | 2,92E-06                   | 146,65             | 32,33              |  |  |  |  |  |  |

Vstupem do TSFM modelu je aktuální výkonová hladina, na výstupu TSFM je generováno zesílení a časové konstanty, které tvoří aktuální přenosovou funkci. Vstupním signálem přenosové funkce je  $\Delta Q$ . Přenosová funkce je z Laplaceova obrazu transformací převedena na diferenciální rovnici. Řešení diferenciální rovnice je odvozeno pro simulaci metodou *snižování řádu derivace* (obr. 5-5).



Obr. 5-5: Metoda snižování řádu derivace a Takagi-Sugeno Fuzzy Model

Identifikace průtoku  $\dot{m}$  je podobná předchozí části odvození tepla Q. Rozdílem je, že pro každou výkonovou hladinu mají různě velké změny  $\Delta \dot{m}$  jiný vliv na výstupní teplotu  $T_{sT}$ . Tato nelinearita je významná a proto jsou odměřeny skokové změny  $\Delta \dot{m}$  -5%, -10%, -15% a -20%. Pro každou výkonovou hladinu jsou získány čtyři identifikační měření. Na základě identifikace se volí přenosová funkce ve tvaru:

$$F_{yin_i} = \frac{K}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)}$$
(5.5)

Vstupem do TSFM je aktuální výkonová hladina a změna průtoku  $\Delta \dot{m}$ . Této změně  $\Delta \dot{m}$  je přiřazeno pět trojúhelníkových funkcí příslušnosti. V TSFM je použito šestnáct pravidel dle tab. 5.

|     | Výkonová hladina |        |       |       |        |       |       |        |       |       |        |       |
|-----|------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
|     | 70 %             |        |       | 80 %  |        |       | 90 %  |        |       | 100 % |        |       |
| Δṁ  | K                | T1     | T2    | K     | T1     | T2    | K     | T1     | T2    | K     | T1     | T2    |
| -20 | -1,42            | 229,35 | 60,54 | -1,34 | 207,34 | 48,64 | -1,24 | 182,56 | 39,5  | -1,15 | 162,15 | 33,23 |
| -15 | -1,35            | 225,31 | 57,75 | -1,27 | 202,49 | 46,84 | -1,18 | 177,94 | 38,21 | -1,09 | 157,79 | 32,26 |
| -10 | -1,28            | 221,28 | 55,15 | -1,21 | 198,45 | 44,84 | -1,12 | 174,01 | 36,74 | -1,03 | 154,13 | 31,11 |
| -5  | -1,22            | 218,17 | 52,32 | -1,15 | 195,04 | 42,76 | -1,06 | 170,75 | 35,12 | -0,98 | 151,03 | 29,82 |

Tab. 5: Parametry přenosové funkce pro  $\Delta \dot{m}$ 

Příklad prvního pravidla:

*IF vykonova*\_hladina = 70 and 
$$\Delta \dot{m} = -20$$
 *THEN*  
 $K = -1.42$  and  $T1 = 229,35$  and  $T2 = 60,54$ 
(5.6)

Výstup TSFM generuje zesílení a časové konstanty podle kombinace dvou vstupů (výkonové hladiny  $\Delta$ % a  $\Delta \dot{m}$ ), které jsou opět použity v metodě snižování řádu derivace.

Identifikace teploty *T* je implementována stejnou metodou jako průtok  $\Delta \dot{m}$ . Skokové změny  $\Delta T$  z pracovního bodu jsou provedeny pro -15%, -10%, -5% a 5%, 10%, 15%, 20%. Přenosová funkce má tvar:

$$F_{yT_i} = \frac{K}{(T_1 s + 1)^3 \cdot (T_2 s + 1)}$$
(5.7)

Vstupem do TSFM modelu je výkonová hladina a změna teploty  $\Delta T$ . Kombinací těchto vstupů na základě dvaceti osmi pravidel, jsou generována zesílení a časové konstanty. Opět je použita metoda snižování řádu derivace. Je upravena pro jiný počet parametrů.

Takto jsou vyřešeny změny  $\Delta Q$ ,  $\Delta \dot{m}$ ,  $\Delta T$  v dané výkonové hladině. Dále je potřeba implementovat přepínání mezi jednotlivými výkonovými hladinami (obr. 5-3). Opět jsou vypočítány přenosové funkce na základě identifikačního měření. Mezi výkonovými hladinami 70, 80, 90 a 100 % existuje dvanáct kombinací různých přechodů (obr. 5-6). Je vytvořen TSFM model jehož vstupem je výkonová hladina a změna výkonové hladiny  $\Delta \%_{i-(i-1)}$ . Je provedena identifikace, zvolená přenosová funkce má tvar (5.8):

$$F_{y\Delta_{\%}} = \frac{K_1 s^2 + K_2 s + K_3}{(Ts+1)^3}$$
(5.8)

Neobvyklý tvar přenosové funkce byl zvolen na základě použití identifikačního toolboxu MATLAB. Byly vyzkoušeny různé struktury přenosů od standardních až po uvedený tvar, který vykazoval největší přesnost a shodu s naměřenými průběhy na nelineárním modelu. Časová konstanta je funkcí změny hladiny  $\Delta %_{i=(i-1)}$ , viz obr. 5-7.



Obr. 5-6: Kombinace reakcí teploty T4 pro změny výkonové hladiny v rozsahu 70-100 %



Obr. 5-7: Funkční závislost časové konstanty přenosové funkce na změny výkonové hladiny

Metoda snižování řádu derivace neumožňuje řešit diferenciální rovnice obsahující derivace vstupního signálu. Proto je použita zobecněná metoda snižování řádu derivace, která se označuje jako *normální forma řiditelnosti*. Vstupním signálem je  $\Delta$ % <sub>n-(n-1)</sub>.

Porovnání lokálně lineárního fuzzy modelu a nelineárního modelu je na obr. 5-8. V tomto simulačním experimentu dochází ke změně teploty *T* a zároveň i tepla *Q* při výkonové hladině 100 %. Druhý simulační experiment je komplexní test. Zobrazuje porovnání lineárního a nelineárního modelu při změně výkonové hladiny  $\Delta$ % a změnách  $\Delta T$ ,  $\Delta Q$ ,  $\Delta m$  (obr. 5-9).

V grafech můžeme pozorovat, že je dosaženo vysoké shody lokálně lineárního a nelineárního modelu. V prvním experimentu jsou prováděny změny přesně o hodnoty, které byly měřeny při identifikaci (5, 10, 15 % apod.). Zde záleží na kvalitě identifikace. Kvalita TSFM se projevuje u druhého experimentu, kdy dochází ke změnám, které nebyly identifikovány. TSFM aproximují tyto mezihodnoty a navržený model velmi dobře reaguje na změny *T*, *Q*, *m* a změny výkonové hladiny  $\Delta$ %.



**Obr. 5-8:** Reakce výstupní teploty na změnu  $\Delta T$ ,  $\Delta Q$ 





Lze konstatovat, že byla navržena fuzzy síť lokálně lineárních modelů, která velmi dobře aproximuje část nelineárního modelu a zvyšuje rychlost simulačního výpočtu. Cílem experimentu bylo ověřit možnosti fuzzy pro návrhy linearizovaných modelů a toto odvětví se jeví jako velmi perspektivní. Dalším krokem by mohlo být vytvoření komplexního linearizovaného technologického celku vyvíjení páry, do něhož vstupují všechny vstupní parametry.

Z fyzikálního pohledu jsou však některé veličiny na sobě závislé, svázané, a to je hlavním nedostatkem tohoto návrhu. Nepřesnost vzniká v případě, kdy dochází současně k velkým změnám na Q a  $\dot{m}$ . V tomto případě neplatí princip superpozice, děj je nelineární a výsledky simulací nedosahují takové kvality. Z matematicko-fyzikální analýzy vyplývá, že se v jedné části vyskytuje násobení těchto dvou veličin, které tyto komplikace způsobuje. Proto se přistoupilo k druhé variantě návrhu fuzzy lineárních modelů. Zde představený návrh fuzzy sítí je v publikaci **[V3]**.

### 5.3 Síť lokálně lineárních modelů pro VT část

Z výše uvedených důvodů byla zvolena jiná koncepce uspořádání lineárních modelů. Struktura je inspirována reálným technologickým popisem dle [**38**] a tentokrát je aplikována pro Šoty I., II. a Výstupní přehřívák VP části přehřívání VT páry. Je založena na identifikačních metodách známé struktury přenosových funkcí. Vycházím z linearizovaného modelu pro soustavu vstřiků, viz obr. 2-3 při definované výkonové hladině. Náhrada VT části nelineárního modelu je rozdělena do tří částí, viz obr. 5-10. Každý přehřívák je definován vlastním přírůstkovým linearizovaným modelem a tyto modely jsou propojeny v sérii.



Obr. 5-10: Struktura náhrady VT části modelu průtočného kotle

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. 5-10) je možno konstatovat, že nelineární charakteristika pro určení ustálené hodnoty výstupu přehříváku  $T_{oUT}(\infty)$  je určena třírozměrnou funkcí

$$T_{OUT}(\infty) = f(P(\infty), T_{IN}(\infty), v_i(\infty))$$
(5.9)

kde  $P(\infty)$  je ustálená výkonová hladina,  $T_{IN}(\infty)$  je ustálená vstupní teplota a  $v_i(\infty)$  ustálená hodnota otevření vstřikovacího ventilu. Pracovní bod, v jehož okolí můžeme provádět parametrickou identifikaci, je definován bodem čtyřrozměrného prostoru viz tab. 9. Souřadnice pracovního bodu je:

$$\{T_{OUT}(\infty), P(\infty), T_{IN}(\infty), v_i(\infty)\}$$
(5.10)

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. 5-11. Linearizovaný model má dva vstupy: teplotu vstupní páry a otevření ventilu, a dva výstupy: teplotu páry na vstupu do přehříváku (za vstřikem) a teplotu na výstupu přehříváku. Tyto teploty vstupují do kaskádní regulace. Zbývající vstupy jako je zdroj tepla, parametry chladicí vody atd. jsou závislé na výkonové hladině, a proto jsou zahrnuty v modelu jako jeho parametry. Před linearizací je nutné zvolit množinu pracovních bodů (OP "operating point"). Každá výkonová hladina odpovídající pracovnímu bodu generuje jinou sadu proměnných, které zajištují ustálený stav výstupu. Pro každý pracovní bod je definována hodnota vstupní a výstupní teploty a hodnoty otevření ventilu, které zajištují ustálený stav v daném pracovním bodě. 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.

Otázkou bylo, jak jemně zvolit krok pro jednotlivé pracovní body, mezi kterými chceme přepínat, abychom dosáhli relativní přesnosti a rychlé odezvy. Pracovní body mohou být lineárně rozmístěny v pracovní oblasti, nebo mohou být zvoleny v závislosti na teorii GAP metriky [**39**]. V mém případě jsem zvolil rovnoměrné rozdělení, které je dostatečné.





Obrázek (obr. 5-12) 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  $\Delta T_{OUT}$ .



Obr. 5-12: Struktura lineární náhrady přehříváku

Dynamické a statické účinky předřazeného vstřiku na změnu teploty páry za vstřikem  $\Delta T_{v}$  jsou aproximovány přenosovou funkcí:

$$F_{\Delta T_{\nu}}(s) = \frac{K_{T\nu}}{T_{T\nu}s + 1} = \frac{\Delta T_{\nu}}{\Delta \nu}$$
(5.11)

Dynamické a statické účinky změn vstupní teploty páry na teplotu páry vystupující z přehříváku  $\Delta T_{OUT-T_{IN}}$  jsou aproximovány přenosovou funkcí:

$$F_{\Delta Tout}(s) = \frac{K_{Tout}}{\left(T_{Tout}s+1\right)^n} = \frac{\Delta T_{OUT-T_{IN}}}{\Delta T_v}$$
(5.12)

Dynamické a statické účinky změn polohy ventilu vstřiku (změna průtoku skrze tepelný výměník) na výstupní teplotu páry  $\Delta T_{out-m}$  jsou aproximovány přenosovou funkcí:

$$F_{\Delta M}(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} = \frac{\Delta T_{out-m}}{\Delta v}$$
(5.13)

Výstupní přehřívák má při reakci na změnu polohy vstřikovacího ventilu celkovou strukturu obrazového přenosu  $G_{\Delta Tout}(s)$ :

$$G_{\Delta Tout}(s) = (F_{\Delta T_v}(s) \cdot F_{\Delta Tout}(s) + F_{\Delta M}(s)) = \frac{\Delta T_{out}}{\Delta v}$$
(5.14)

Jednotlivé parametry přenosových funkcí byly získány pomocí identifikačních metod. Identifikační proces nelineárního modelu jsem provedl pro technologickou jednotku přehřevu páry průtočného kotle v rozsahu 50 – 100 % výkonové hladiny s rozdělením po 10 %. Identifikace přenosových funkcí je založena na datech simulovaných na nelineárním modelu v okolí požadovaných pracovních bodů výkonové hladiny. Z těchto dat byly aproximovány parametry přenosových funkcí. Jsou obecně n -tého řádu s proměnnými časovými konstantami a zesíleními, které jsou funkcí výkonové hladiny. Parametry pro jednotlivé výkonové hladiny jsou uvedeny v tabulkách tab. 6, tab. 7 a tab. 8. Parametry otevření ventilů, vstupní a výstupní teploty zajištující ustálenou hodnotu v definovaném pracovním bodě je v tab. 9.

| ŠOTY I.      |                              |                       |   |                             |                      |                           |                          |  |  |  |  |
|--------------|------------------------------|-----------------------|---|-----------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|--|--|--|--|
| Výk. hladina | <b>K</b> <sub>Tout</sub> [-] | T <sub>Tout</sub> [s] | n | <b>К</b> <sub>Тіп</sub> [-] | T <sub>Tin</sub> [s] | <b>K</b> <sub>m</sub> [-] | <i>T<sub>m</sub></i> [s] |  |  |  |  |
| 50 %         | 1,0953                       | 29                    | 1 | -99,685                     | 2,8; 3,9             | -5,9869                   | 25                       |  |  |  |  |
| 70 %         | 1,13                         | 20                    | 1 | -57,881                     | 2,8; 3,9             | -3,5237                   | 18                       |  |  |  |  |
| 90 %         | 1,145                        | 14                    | 1 | -37,731                     | 2,8; 3,9             | -2,2899                   | 13                       |  |  |  |  |
| 100 %        | 1,153                        | 12                    | 1 | -30,012                     | 2,8; 3,9             | -1,8182                   | 11                       |  |  |  |  |

Tab. 6: Přehled koeficientů modelu pro ŠOTY I.

| -  |        |      |   |         |   |         |    |  |  |  |
|--|--------|------|---|---------|---|---------|----|--|--|--|
| ŠOTY II.   |        |      |   |         |   |         |    |  |  |  |
| Výk. hladina $K_{Tout}[-]$ $T_{Tout}[s]$ $n$ $K_{Tin}[-]$ $T_{Tin}[s]$ $K_m[-]$ $T_{Tin}[s]$ |        |      |   |         |   |         |    |  |  |  |
| 50 %   | 1,0888 | 26   | 2 | -102,66 | 6 | -6,9891 | 36 |  |  |  |
| 70 %   | 1,1231 | 17   | 2 | -63,418 | 6 | -4,5297 | 25 |  |  |  |
| 90 %   | 0,9206 | 12,5 | 2 | -40,967 | 6 | -3,0262 | 20 |  |  |  |
| 100 %  | 0,5808 | 9,8  | 2 | -33,21  | 6 | -2,4791 | 16 |  |  |  |

Tab. 7: Přehled koeficientů modelu pro ŠOTY II.

Tab. 8: Přehled koeficientů modelu pro VP

| VÝSTUPNÍ PŘEHŘÍVÁK |                       |    |                      |                      |                           |                    |       |  |  |  |
|--------------------|-----------------------|----|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|-------|--|--|--|
| Výk. hladina       | T <sub>Tout</sub> [s] | n  | K <sub>Tin</sub> [-] | T <sub>Tin</sub> [s] | <i>K</i> <sub>m</sub> [-] | T <sub>m</sub> [s] |       |  |  |  |
| 50 %               | 1,0675                | 43 | 4                    | -118,74              | 1,69; 1,82; 3,8           | -11,977            | 100   |  |  |  |
| 70 %               | 0,7919                | 39 | 3                    | -73,69               | 1,69; 1,82; 3,8           | -9,39              | 70    |  |  |  |
| 90 %               | 0,7034                | 28 | 3                    | -48,99               | 1,69; 1,82; 3,8           | -8,16              | 50    |  |  |  |
| 100 %              | 0,7169                | 25 | 3                    | -40,63               | 1,69; 1,82; 3,8           | -7,21              | 43,44 |  |  |  |

| Výkon | V1 <sub>OP</sub> | V2 <sub>OP</sub> | V3 <sub>OP</sub> | T <sub>ST OP</sub> | T1 <sub>IN OP</sub> | T1 <sub>OUT OP</sub> | T2 <sub>IN OP</sub> | T2 <sub>OUT OP</sub> | T3 <sub>IN OP</sub> | T3 <sub>OUT OP</sub> |
|-------|------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| [%]   | [-]              | [-]              | [-]              | [°C]               | [°C]                | [°C]                 | [°C]                | [°C]                 | [°C]                | [°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                  |

Tab. 9: Přehled statických parametrů pro ustálenou výkonovou hladinu

Přepínání mezi výkonovými hladinami je zajištěno pomocí bloku *Lookup Table* v programu MATLAB Simulink. Tento blok používá vstupní hodnoty ke generování výstupu užitím lineární interpolační metody. Jednotlivé přenosové funkce jsou převedeny na diferenciální rovnice užitím *Laplace transformace* a jsou do simulačního software implementovány pomocí metody snižování řádu derivace resp. normální forma řiditelnosti Jednou z výhod modelu je jeho beznárazové přepínání, jelikož se parametry spojitě mění v závislosti na aktuální výkonové hladině. *Lookup Table* na základě známých hodnot parametrů přenosových funkcí pro pracovní hladiny 50, 70, 90 a 100 % generuje hodnoty parametrů i pro ostatní výkonové hladiny.

Výsledný řád celého identifikačního modelu je 13 (Šoty I. a II. jsou čtvrtého řádu a vstupní přehřívák je sedmého řádu). Spojením tří lineárních modelů představující Šoty I., Šoty II. a Výstupní přehřívák dle obr. 5-13 získáme celou VT část technologického celku. Tento celek je testován změnami na jednotlivých ventilech a přechody mezi výkonovými hladinami. První sada experimentů použitá pro verifikaci parametrů modelu testuje lineární model na změnu otevření vstřikovacího ventilu, při zachování konstantní úrovně výkonové hladiny. Pro experiment je výhodné měnit otevření ventilu *VI*, protože je na počátku systému a ovlivňuje tak všechny tři přehříváky za sebou. První experiment je proveden při výkonové hladině 50 % a ventil *VI* je od svého pracovního bodu 0,01364 (tab. 9) skokově otevřen o +0,1 v čase t = 20 s, resp. o -0,05 v čase t = 2000 s (obr. 5-14). Ostatní ventily jsou drženy na hodnotě zajištující ustálený stav pro výkonovou hladinu 50 %. Průběhy výstupní teploty za jednotlivými přehříváky a jejich porovnání s nelineárním modelem můžeme vidět na grafech obr. 5-15 až obr. 5-17.



Obr. 5-13: Celková struktura lineárního modelu VT části (SI+SII+VP)



Obr. 5-14: průběh otevření ventilu VI

Obr. 5-15: Teplota za Šoty I.



Z grafů je patrné, že v porovnání s nelineárním modelem vyžaduje linearizovaný model verifikaci ve statické oblasti pomocí parametrů zesílení přenosových funkcí. Na obr. 5-18 až obr. 5-20 je opakovaný experiment s aktualizovanými parametry, kde je vidět shoda modelů jak ve statické, tak v dynamické oblasti odezvy výstupní teploty.





Obr. 5-20: Teplota za VP

Druhý experiment v této sadě testů byl proveden na výkonové hladině 100 % pro změnu otevření ventilu z pracovního bodu dle obr. 5-21. Porovnání nelineárního a lineárního modelu pro výstupní teploty z přehříváků jsou na obr. 5-22 až obr. 5-24.

1.8

0.

-0

.1.4

-2 L

Tout SI [C]



Obr. 5-21: Průběh otevření ventilu V1



Obr. 5-23: Teplota za Šoty II.

1000 2000 3000 4000 5000 čas [s]

∆Tout SI při změně na V1 +0.05 -0.1 +0.05 pro 100%

nelin lin

Obr. 5-22: Teplota za Šoty I.



Obr. 5-24: Teplota za VP

Po verifikačních testech jsem použil další dvě rozdílné metody porovnání originálního nelineárního a vytvořeného lineárního modelu. V první metodě jsem uzavřel nelineární model s původním řídicím PI systémem ve zpětné vazbě. Dále byly provedeny odpovídající změny výkonové hladiny a získané časové průběhy všech důležitých vstupů a výstupů systému s řízením jsem uložil do souboru. Uložené vstupy (průběhy akčních zásahů generované řídicím obvodem) jsem poté aplikoval do lineárního modelu v otevřené smyčce pro stejné změny výkonové hladiny. Nakonec jsem získané průběhy odezvy lineárního modelu porovnal s uloženými odezvami nelineárního modelu. V této metodě nelineární i lineární model použijí do vstupu stejné časové průběhy akčních veličin, tedy v ideálním případě by měl lineární model generovat stejné výstupní signály. Tuto metodu nazývám *"bez řízení"*, protože lineární model neobsahuje řídicí obvod.

Ve druhé metodě je nelineární model uzavřen ve zpětné vazbě s řídicím systémem a stejný řídicí systém je použit ve zpětné vazbě a připojen k lokálně lineárnímu modelu. Paralelně máme tedy dva nezávislé uzavřené regulační obvody. Opět jsem provedl odpovídající změny výkonové hladiny a v ideálním případě by měly být vstupy a výstupy nelineárního a lineárního modelu stejné. Tuto metodu jsem nazval *"s řízením"*.

Pro simulační experimenty v obou metodách jsem použil trendové změny výkonové hladiny (tendence 50 % za 1800 s) a skokové změny výkonové hladiny (tendence 50 % za 90 s). Tyto požadované změny výkonové hladiny odpovídají reálným operačním režimům průtočného kotle v tepelné elektrárně. Použité experimenty:

#### metoda "*bez řízení* ":

- Skoková změna výkonové hladiny z 50 % na 60 %
  - porovnání průběhů teplot za vstřikem (vstup do přehříváku) je na obr. 5-25
  - porovnání průběhů výstupních teplot je na obr. 5-26
- Trendová změna výkonové hladiny z 50 % na 100 %
  - porovnání průběhů teplot za vstřikem (vstup do přehříváku) je na obr. 5-27
  - porovnání průběhů výstupních teplot je na obr. 5-28



Obr. 5-25: Porovnání  $T_{\rm mix}$  – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %



Obr. 5-26: Porovnání  $T_{\scriptscriptstyle out}$  – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %



Obr. 5-27: Porovnání  $T_{\rm mix}$  – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %



Obr. 5-28: Porovnání  $T_{\scriptscriptstyle out}$  – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %

Průběhy akčních veličin nejsou zobrazeny, protože jsou identické (viz Popis experimentu metody). V druhé metodě porovnáváme pouze výstupní teploty, protože teploty na vstupech přehříváků jsou téměř identické. Ale navíc zobrazujeme průběhy akčních veličin generované stejným řídicím systémem pro lokálně lineární a nelineární model.

#### metoda "s řízením":

- Skoková změna výkonové hladiny z 50 % na 60 %
  - porovnání průběhů výstupních teplot je na obr. 5-29
  - porovnáni průběhů akčních veličin je na obr. 5-30
- Trendová změna výkonové hladiny z 50 % na 100 %
  - porovnání průběhů výstupních teplot je na obr. 5-31
  - porovnání průběhů akčních veličin je na obr. 5-32



Obr. 5-29: Porovnání  $T_{out}$  – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %



Obr. 5-30: Porovnání otevření ventilů – skoková změna výkonu z 50 % na 60 %



Obr. 5-31: Porovnání  $T_{\rm out}$  – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %



Obr. 5-32: Porovnání otevření ventilů – trendová změna výkonu z 50 % na 100 %

Z grafů je zřejmé, že náhrada nelineárního modelu části průtočného kotle sítí lokálně lineárních modelů má velmi podobné statické i dynamické vlastnosti. Největší rozdíly jsou v případě změny výkonové hladiny z 50 % na 100 % (obr. 5-28), ale je důležité zdůraznit, že se jedná o extrémní případ změny výkonové hladiny přes celý pracovní rozsah. Odchylky jsou způsobeny tím, že při regulaci dosahují hodnoty vstupů větší vzdálenosti od pracovního bodu, než pro jaké odchylky byla provedena identifikace, a dále volbou menší hustoty pracovních bodů, i přesto je však model dostatečně přesný. Sériové spojení jednotlivých přehříváků má také vliv na odchylky od nelineárního modelu. Odchylka předřazeného přehříváku má dopad na následující přehřívák, jak můžeme vidět např. na obr. 5-26. Pokud se podíváme na porovnání metody se zapojeným regulačním obvodem, tak odchylky teplot jsou menší, než pro ten samý experiment, ale bez regulačního obvodu. To způsobuje fakt, že regulační obvod vyrovnává tyto odchylky rozdílnými akčními zásahy, viz obr. 5-30 a obr. 5-32.

Hlavním cílem bylo vytvořit model, který bude v simulaci výrazně rychlejší než nelineární model. Výsledný simulační model je tvořen s cílem dosáhnout maximální přesnosti ve statice, uspokojivé přesnosti v dynamice a rozumné výpočetní nároky.

Náhrada pomocí sítě lokálně lineárních modelů dosahuje přibližně 20x rychlejší simulační časy<sup>7</sup>, což přináší výraznou úsporu času při optimalizačních výpočtech parametrů nových regulátorů. Tento linearizovaný model je výrazně rychlejší a více flexibilnější při návrhu nových řídicích algoritmů, ale i přesto je nezbytné při finálním testování používat originální nelineární model **[V4]**.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Odpovídá specifikaci PC: Intel Core i5 CPU 650@ 3,20 GHz, 4,00 GB RAM

# 6 Optimalizace parametrů fuzzy Pl regulátorů

### 6.1 Formulace optimalizační úlohy

Při hledání vhodných fuzzy přístupů pro řízení procesu přehřevu páry vycházím ze známé struktury fuzzy PI regulátorů tak, jak byly popsány v kapitole 4.3. Cílem je náhrada stávajícího řízení pomocí adaptivních PI regulátorů s proměnnými parametry za fuzzy PI regulátory (F-PI) s pevnými parametry. Tak jak bylo již řečeno, stávající forma řízení obsahuje řadu zesložiťujících vazeb, jako jsou proměnné koeficienty, množství logických funkcí, dopředné vazby apod. Tyto heuristiky jsou nutné k tomu, aby byly PI regulátory vůbec schopné zajišťovat požadavky na minimální kvalitu regulace dle požadavků provozovatele.

Moji snahou je celou tuto strukturu maximálně zjednodušit a zpřehlednit, a k tomu právě využít fuzzy PI regulátory, které mají nelineární charakteristiky a navrhují se jako diskrétní regulátory. Stávající kaskádní struktura je zachována a PI regulátory jsou nahrazeny za fuzzy PI regulátory **[V5]**. Struktura technologie přehřáté páry s kaskádním fuzzy PI řídicím systémem je na obr. 6-1. Je oproštěna o veškeré přidané vazby a nabízí tedy maximální přehlednost. Struktura každého z použitých šesti fuzzy PI regulátorů je unifikována a má podobu dle obrázku obr. 6-2.



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

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. 9 a současně zajistit, aby byl regulační pochod dostatečně tlumený.

### 6.2 Struktura optimalizovaných fuzzy regulátorů

Ústřední částí fuzzy PI regulátoru je "Fuzzy Logic Controller" (FLC), ve kterém je zajištěna fuzzifikace, inference a defuzzifikace - podrobný popis a význam těchto bloků je v kapitole 4.1. Pro počáteční nastavení se většinou využívá fuzzy PI regulátorů se základními zobecněnými meta-pravidly např. dle tab. 1.



Obr. 6-2: Struktura fuzzy PI regulátoru

Pro další zlepšení kvality regulace se využije změny zesílení parametrů měřítka universa  $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPI}$ . Proces adaptace parametrů PI regulátorů je založen na vhodném výběru parametrů z báze znalostí a zkušeností. Při použití fuzzy regulátorů musíme počítat s tím, že existuje mnoho faktorů, které ovlivňují kvalitu regulace. Tyto faktory jsou popsány v kapitole 4.6, přičemž na základě ověřovacích experimentů jsem se rozhodl použít fuzzy regulátory, které jsou definovány následujícími parametry, která je výchozím stavem pro optimalizaci řídicího algoritmu a parametrů regulace:

- Lingvistické proměnné (regulační odchylka a její přírůstek) mají ve finálním tvaru 9 termů, viz obr. 6-3, stejně jako přírůstek akční veličiny.
- Funkce příslušnosti jsou trojúhelníkového typu se zahuštěním do středu, které má pozitivní vliv na tlumení kmitů kolem žádané hodnoty. Bylo testováno i rovnoměrné rozložení trojúhelníkové i Gaussovo rozložení, ale tato nastavení neposkytovala tak kvalitní výsledky.
- Universa jsou nastavena v rozsahu <-1,1>.
- Je vygenerováno 81 pravidel dle kapitoly 4.1, pro kombinace vstupních proměnných regulační odchylky a její první derivace. Tvar plochy přírůstků akčních zásahů je na obr. 6-4.

- Byla použita defuzzifikační metoda ve fuzzy toolboxu MATLAB nazývaná *centroid*, což je "Centre of Area", která je popsána vztahem (4.22).
- Struktura fuzzy PI regulátoru doplněna ve výstupní smyčce doplněna o saturační blok s mezemi 0-1: ochrana před *WIND-UP* efektem (obr. 6-2)
- Z obrázku obr. 6-2 je zřejmé, že každý z šesti PI regulátorů má možnost parametrizace tří zesílení (K<sub>e</sub>, K<sub>Δe</sub> na vstupu a K<sub>uPI</sub> na výstupu z FLC). Celkem je tedy možné ovlivňovat fuzzy algoritmus pomocí 18 zesílení.





### 6.3 Strategie optimalizace – pracovní hypotézy

Hlavním parametrem kvality regulace je teplota za výstupním přehřívákem a dále průběhy akčních zásahů. Kvalita fuzzy regulace je porovnávána s původní PI regulací. Cílem je nalézt takové nastavení parametrů fuzzy regulátorů, aby výstupní teplota přehřáté páry z výstupního přehříváku VP měla kvalitnější průběh, tedy požadovanou toleranci, překmit atd., než původní PI regulace. Prvotní hledání parametrů lze získat heuristickým přístupem a optickým porovnáním výstupních průběhů, ale elegantnější řešení je využít možností optimalizačních přístupů. Otázkou je volba vhodné varianty optimalizace, která poskytne rozumné výsledky.

Můžeme uvažovat o spojitém, nebo o diskrétním přístupu. V případě spojitého se jeví jako nejvhodnější použít metody nejmenších čtverců, které se snaží nalézt minimální odchylku mezi žádaným průběhem výstupní teploty a simulovanou odezvou s danými parametry v každém kroku iteračního procesu. Minimalizační kritérium má obecně tvar (6.1)

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

Kde X je vektor hledaných parametrů, w(i) je hodnota žádané hodnoty na výstupu přehříváku *i*,  $y_M(i, X)$  je simulovaná odezva teploty přehřáté páry za výstupním přehřívákem, N odpovídá době simulace. Dále byly zkoušeny i jiné formy minimalizačních kritérií jako absolutní nebo použití vážené druhé derivace regulační odchylky.

Pro softwarové řešení minimalizační úlohy byla použita funkce v MATLAB *fminsearch* **[40]**, která umožnuje nalézt minimum funkce několika proměnných startující s počátečním odhadem. Obecně je označována jako nepodmíněná nelineární optimalizace.

Ať již používáme k hledání parametrů fuzzy regulátorů metody založené na heuristickém přístupu, či hledání pomocí minimalizačních kritérií, vždy to přináší otázku, jakou zvolit strategii. Je zřejmé, že hledání osmnácti parametrů v rámci jedné optimalizace je téměř nemožné, i kdybychom správně provedli počáteční odhad a provedením citlivostní analýzy upřednostnili některé z parametrů jako významnější. Tento multidimenzionální problém přináší spoustu problémů. Abychom se těmto složitostem vyhnuli, využijeme technologického zapojení řízeného procesu, který je složen ze tří přehříváků zapojených v sérii za sebou, a tedy první přehřívák při požadavku na změnu operační výkonové hladiny ovlivňuje dva v sérii následující přehříváky, viz obr. 6-1. Každý přehřívák zahrnuje svůj vlastní regulační obvod kaskádní struktury s fuzzy PI regulátorem v malé a velké smyčce (obr. 6-1), kde každý fuzzy PI regulátor obsahuje 3 parametry použitelné pro nastavení zesílení. 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 6 parametrů.

Výběr vhodných strategií začneme od nejjednodušších postupů. V publikaci [**24**] je popsána jedna z variant možných optimalizací, která je založena na principu nalezení takových hodnot měřítek  $K_e, K_{\Delta e}, K_{\mu PI}$ , 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 heuristicky na níže popsaném experimentu v kapitole 6.4. Nejprve budeme hledat šest parametrů pro regulaci výstupní teploty na Šoty I., abychom normalizovali vstupy tak, abychom využili universum maximálně, a teprve poté postupujeme k dalším přehřívákům v sérii. Parametry jsou v tomto ověřovacím experimentu hledány ručně.

Druhá metoda je založená na minimalizačním kritériu (6.1). Hledání všech parametrů (18) je nejen výpočetně neefektivní, ale i téměř neřešitelné. Zvláště, když neznáme relevantní počáteční odhady hledaných parametrů a řešení tak velmi často spadá do lokálního minima. Proto přistupujeme k hledání jen některých parametrů za podmínky, kdy jsou ostatní parametry konstantní. Pro výpočet kritéria je nutné znát vektor žádaných hodnot na výstupu přehříváku. V tomto případě je řešení jednoduché, protože žádané hodnoty teploty přehřáté páry přes všechny výkonové hladiny je nutné držet na konstantní hodnotě a to 460 °C pro Šoty I., 485 °C pro Šoty II. a 575 °C pro VP. Tím je dána množina žádaných hodnot v optimalizačním kritériu. Testování průběhů regulačních pochodů i hledání optimálních vlastnosti fuzzy regulátorů, které bylo provedeno, jsou kombinací následujících variant numerických experimentů:

- Testy reakcí fuzzy algoritmu na skokové a trendové změny různých výkonových hladin
- Optimalizace implementována na lineárním i nelineárním modelu
- Optimalizační úloha minimalizuje teplotu přehřáté páry Šoty I.
- Optimalizační úloha minimalizuje teplotu přehřáté páry Šoty II.
- Optimalizační úloha minimalizuje teplotu přehřáté páry VP

- Vektor hledaných parametrů je uvažován v následujících kombinacích:
  - o pouze výstupní zesílení  $K_{uPI}$  na jednom přehříváku [1x1] citlivostní analýza
  - vektor výstupních zesílení  $K_{uPI}$  v malé a velké smyčce přehříváku [2x1]
  - o vektor všech výstupních zesílení tří přehříváků [6x1]
  - vektor  $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPI}$  ve velké smyčce přehříváku [3x1]
  - vektor  $K_e, K_{\Delta e}, K_{uPI}$  v malé smyčce přehříváku [3x1]
  - vektor vstupních zesílení  $K_e, K_{\Delta e}$  [2x1]
- Volby různých parametrů funkce *fminsearch* (počet iterací, tolerance hledaného vektoru *x*, tolerance průběhu apod.)
- Volby minimalizačních kritérií: kvadratické, absolutní, s váženou druhou derivací regulační odchylky

V dalších kapitolách jsou tyto dvě metody představeny na konkrétních experimentech.

# 6.4 Optimalizace založená na maximálním využití vstupních intervalů

Testovaným experimentem je skoková<sup>8</sup> změna tepelného výkonu ze 100 % na 50 % s trendem 50 % za 90 s. Jedná se o operační režim vycházející z reálných provozních situací na elektrárně. Jde o významnou změnu, která pokrývá celý výkonový rozsah, a proto je jednou z nejsložitějších úloh regulace teploty páry. Právě proto byl tento experiment zvolen. Požadavek skokové změny vyvolá na výstupu z bifluxu (obr. 2-3) reakci teploty  $T_{biflx}$  (obr. 6-5), která je vstupem do technologické části VT přehřevu páry a lze ji chápat jako vstupní poruchu na vstupu do Šoty I. Tato změna

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Skokovou změnu výkonové hladiny budeme v celé práci chápat jako velmi rychlý trend, blížící se skoku. Rychlost trendu je 50 % za 90 s.

výkonové hladiny se projevuje na vstupu do VT části dle obr. 6-5. Změna teplot  $T_{biflx}$  je až o 35 °C, přičemž na výstupu VT části požadujeme teplotu páry  $T_{VT}$  v toleranci ±2 °C.



Obr. 6-5: Reakce  $T_{biflx}$  při změně výkonové hladiny ze 100 na 50 %

Optimalizace probíhala přímo na nelineárním modelu. Na obr. 6-6 je teplota přehřáté páry  $T_{VT}$  na výstupu výstupního přehříváku (VP), při výchozím stavu fuzzy řídicího algoritmu, jak je uveden v kapitole 6.1. Je zřejmé, že se nejedná o optimální nastavení regulace. Průběh teploty je sice ustálen na žádané hodnotě, ale zahrnuje viditelné kmity a amplituda překmitu je cca ±5 °C.

V první části jsem provedl 14 experimentálních simulací s různými variantami parametrů  $K_e, K_{\Delta e}, K_{\mu PI}$  jak vnitřní, tak vnější smyčky kaskádní regulace Šoty I. (viz Příloha A), abych docílil maximálního využití vstupního intervalu (universa) FLC. Výsledek je uveden na obr. 6-7, kde je průběh regulační odchylky a její první derivace pro vnitřní i vnější regulátor kaskádní regulace Šoty I. Z grafu je patrné, že universum je využito v celém rozsahu <-1,1>.



**Obr. 6-6: Teplota**  $T_{VT}$  bez optimalizace



Obr. 6-7: Průběh  $e, \Delta e$  – vnitřní a vnější smyčka - Šoty I.

Dalších 7 simulačních experimentů bylo poté realizováno na Šoty II., úpravou parametrů bylo docíleno rozložení vstupů do vnitřního a vnějšího regulátoru Šoty II. viz obr. 6-8. Dalších 12 experimentů sloužilo k nastavení kaskádní smyčky výstupního
přehříváku VP. Toto nastavení je již velmi citlivé na změny parametrů, a proto se nepodařilo najít takové parametry, které by využily universum na maximum, viz obr. 6-9. I přesto je výsledný průběh kvalitnější než původní výchozí nastavení, viz obr. 6-10.



**Obr. 6-8:** Průběh  $e, \Delta e$  – vnitřní a vnější smyčka - Šoty II.

Všechny použité parametry lze nalézt v přehledu, viz *Příloha A*. Porovnání průběhu optimalizované a původní teploty přehřáté páry při skoku výkonové hladiny je na obr. 6-10. Z grafu je patrné, že toto nastavení přináší výrazné zlepšení průběhu výstupní teploty oproti původnímu nastavení. Amplituda překmitu je výrazně nižší, doba ustálení je rychlejší a průběh není tak kmitavý. Nicméně i toto "ruční" nastavení pokládáme za sub-optimální a pokusíme se ho vylepšit použitím některé z optimalizačních metod s využitím minimalizačních kritérií. Významnější porovnání vůči původní PI regulaci včetně průběhu akčních zásahů na vstřikovacích ventilech a další důležité charakteristiky naleznete v kapitole 7, **[V6]**.







porovnání - teplota na výstupu přehříváku T<sub>VT</sub>

Obr. 6-10: Porovnání původní a optimalizované nastavení fuzzy PI regulace

# 6.5 Optimalizace založená na minimalizačním kritériu

Cílem této kapitoly je nalézt vhodné řešení optimalizační úlohy založené na minimalizačním kritériu. Pokusme se optimalizovat teplotní průběh na výstupu přehříváku VP, který je uveden červenou barvou na obr. 6-10. Cílem je, aby získaná sada parametrů byla vhodná pro regulaci nejen tohoto konkrétního experimentu skokové změny 100-50 %, ale i pro ostatní běžné operační režimy. Proto byl pro optimalizační úlohu záměrně vybrán extrémní případ skokové změny výkonové hladiny pokrývající celý rozsah sledovaných změn ze 100 % na 50 % rychlostí přechodu 50 % za 90 s a dále budeme pracovat s druhou skupinou operačních režimů a to trendovou změnou výkonové hladiny z 50 % na 100 % s trendovou rychlostí 10 MWt<sup>9</sup> za 60 s, která je opačným extrémem ke skokovým provozním režimů.

Na základě provedených experimentů a zkušeností se jeví, že mezi parametry, které nejvíce ovlivňují kvalitu regulace, patří parametr  $K_{uPI}$  na výstupu jednotlivých fuzzy PI regulátorů. Dále lze pozorovat, že nejcitlivější na změny parametrů je poslední ze tří přehříváků v sérii, a to výstupní přehřívák VP. Na základě tohoto zjištění budeme proto vycházet ze snížení počtu optimalizovaných parametrů dle 1) a možnosti doladění pomocí zvolených parametrů dle 2):

- 1) Vektor hledaných parametrů fuzzy regulátoru bude zahrnovat výstupní parametry  $K_{uPI}$  fuzzy PI regulátorů vnitřní i vnější smyčky přehříváků Šoty I., Šoty II. a VP
- 2) Pro případně doladění budou použity vstupní parametry  $K_e, K_{\Delta e}$  fuzzy PI regulátorů vnitřní i vnější smyčky přehříváku VP

V tab. 10 jsou uvedeny výchozí parametry fuzzy PI regulátorů získané z optimalizace v předchozí kapitole 6.4. Žlutou barvou jsou označeny výstupní parametry fuzzy PI regulátorů, které se pokusíme optimalizovat a světle modře zbylé čtyři parametry, sloužící k doladění regulace.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> MWt - MW tepelných

|                | SI    |        | SII    |        | VP    |      |
|----------------|-------|--------|--------|--------|-------|------|
|                | IN    | OUT    | IN     | OUT    | IN    | OUT  |
| K <sub>e</sub> | 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 |

Tab. 10: Výchozí sada parametrů z předchozí optimalizace

Vzhledem ke složitosti nelineárního modelu využijeme pro iterační výpočty optimalizační úlohy síť lokálně lineárních modelů, viz kapitola 5.3, kterými nahrazujeme nelineární model. I tak je výpočetní náročnost jedné úlohy (100 iteračních kroků) v řádech hodin<sup>10</sup>. Síť lokálně lineárních modelů ve spojení s fuzzy regulačním systémem je implementována v programu MATLAB Simulink a optimalizační úloha je vytvořena jako m-file s voláním funkce minimalizačního kritéria. Po spuštění programu je proveden simulační výpočet modelu s fuzzy regulačním obvodem s počátečním nastavením vektoru hledaných parametrů fuzzy regulátorů. Ze simulačního výpočtu jsou získána data časového průběhu odezvy výstupní teploty přehříváku, která jsou použita v minimalizačním kritériu (6.1). 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.

#### 6.5.1 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 provedeme hledání dvojice parametrů výstupních zesílení  $K_{uPI-SI-IN}$  a  $K_{uPI-SI-OUT}$  pro dva fuzzy PI regulátory F-PI-1 a F-PI-2 (obr. 6-1) vnitřní a vnější regulační smyčky Šoty I.

Do minimalizačního kritéria (6.1) vstupuje jako vektor žádaných hodnot konstantní žádaná teplota na výstupu Šoty I. dle tab. 9 a simulovaná odezva teploty na výstupu Šoty I. s aktuálním nastavením hledaného vektoru parametrů. Pro počáteční odhad parametrů je použito prozatímní nejlepší nastavení z předchozí kapitoly 6.4.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Odpovídá specifikaci PC: Intel Core i5 CPU 650@ 3,20 GHz, 4,00 GB RAM

Doba trvání simulace je 4000 s. Kvadratické minimalizační kritérium má poté tvar (6.2) :

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

 $T_{I OUT SI}$  je funkcí hledaných parametrů  $K_{uPI-SI-IN}$  a  $K_{uPI-SI-OUT}$ .

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

Na obr. 6-11 je průběh teploty na výstupu Šoty I. po optimalizaci 50 iteračních kroků. Zelenou barvou je označen počáteční stav vycházející z optimalizace v kapitole 6.4, Purpurovou barvou je označen koncový stav optimalizace. Optimalizací dvou parametrů jsme docílili výrazného zlepšení průběhu výstupní teploty Šoty I.  $T_{1 \ OUT \ SI}$  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  $T_{2 \ OUT \ SII}$  Šoty II. viz obr. 6-12 a samozřejmě i na nejdůležitější teplotě  $T_{VT}$  na výstupu přehříváku VP viz obr. 6-13. Optimalizaci 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. 6-11: Optimalizace parametrů Šoty I. – odezvy teploty na výstupu Šoty I.







Obr. 6-13: Optimalizace parametrů Šoty I. – odezvy teploty  $T_{VT}$  na výstupu VP

Při optimalizaci na Šoty II. je vstupem do optimalizace konstantní žádaná teplota na výstupu Šoty II., viz tab. 9 a simulovaná odezva teploty na výstupu Šotu II. Kritérium pro optimalizaci parametrů Šoty II. má tvar (6.4), teplota je funkcí parametrů dle (6.5).

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

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

Obr. 6-14 je rozšířením grafu z obr. 6-12. Zelenou barvou označen průběh teploty  $T_{2 OUT SII}$  při optimalizaci parametrů fuzzy regulátoru na Šoty II. Purpurová barva označuje koncový stav optimalizační úlohy ve druhém kroku. Je stále zřetelné zlepšení na průběhu teploty  $T_{2 OUT SII}$ , na průběhu teploty  $T_{VT}$  se však zásadně neprojeví, viz obr. 6-15.



Obr. 6-14: Optimalizace parametrů Šoty II. – odezvy teploty na výstupu Šoty II.



Obr. 6-15: Optimalizace parametrů Šoty II. – odezvy teploty 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. 6-16. Kritérium pro optimalizaci parametrů VP má tvar (6.6):

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

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

Světle modrou barvou je označen průběh teploty  $T_{VT}$  při optimalizaci parametrů fuzzy regulátoru na VP. Purpurová barva označuje koncový stav celé optimalizační úlohy. Je zřejmé, že největší váhu při optimalizaci průběhu výstupní teploty výstupního přehříváku  $T_{VT}$  mají parametry fuzzy regulátorů na Šoty I. a VP.



**Obr. 6-16: Optimalizace parametrů VP – odezvy teploty**  $T_{VT}$  **na výstupu VP** 

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

V předchozí podkapitole jsme řešili optimalizační úlohu, kde jsme postupně měnili<sup>11</sup> kritérium pro minimalizaci výstupní teploty jednotlivých přehříváků v sérii. V této části vyzkoušíme přístup, kde kritérium zůstane ve všech krocích totožné a bude v něm figurovat výstupní teplota  $T_{VT}$ , tedy teplota, která je v regulační úloze nejvíce významná. Kritérium pro optimalizační úlohu má tvar (6.8):

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

S tím rozdílem, že v prvním kroku je teplota  $T_{vT}$  funkcí výstupních parametrů fuzzy PI regulátorů na Šoty I. (6.9), v druhém kroku je funkcí výstupních parametrů fuzzy PI regulátoru na Šoty II. (6.10) a v posledním kroku je funkcí parametrů fuzzy PI regulátoru na VP (6.11).

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

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

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

Na obrázcích obr. 6-17 a obr. 6-18 jsou zobrazeny průběhy teplot na Šoty I. a II. v iteračním procesu. Na obr. 6-19 je výsledný průběh odezvy teploty  $T_{vT}$ po optimalizaci šestice výstupních parametrů ve třech krocích. Červená barva označuje výchozí stav – výstupní teplota  $T_{vT}$  na nelineárním modelu získaná z kapitoly 6.4. Tmavě modrou barvou jsou zobrazeny jednotlivé iterace po prvním kroku optimalizace parametrů  $K_{uPI-SI-IN}, K_{uPI-SI-OUT}$  na Šoty I. Druhý krok je zobrazen zelenou barvou a představuje optimalizaci parametrů  $K_{uPI-SII-IN}, K_{uPI-SII-OUT}$  na Šoty II., která opět nepřinese zlepšení. Světle modrou barvu má třetí krok optimalizační úlohy, kdy hledáme vhodné výstupní parametry  $K_{uPI-VP-IN}, K_{uPI-VP-OUT}$  na VP. Purpurová barva znázorňuje výsledek optimalizační úlohy po vykonání všech tří posloupných kroků. V porovnání s výsledky předchozí optimalizace na obr. 6-16 získáváme velmi podobný

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> V kritériu byly postupně ve třech krocích minimalizovány výstupní *equation reference goes here*teploty za jednotlivými přehříváky

průběh výstupní teploty na lineárním modelu, s čímž korespondují i velmi podobné hodnoty sady vypočítaných parametrů, viz tab. 11. Opět lze pozorovat, že největší přínos pro optimalizaci průběhu výstupní teploty  $T_{VT}$  mají parametry fuzzy regulátoru na Šoty I. a VP.





Obr. 6-17: Optimalizace - průběh teploty na SI





**Obr. 6-19: Optimalizace parametrů SI, SII a VP – průběh teploty**  $T_{VT}$  na výstupu VP

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

Ze dvou optimalizačních úloh byly získány dvě sady parametrů (tab. 11), které byly ověřeny na nelineárním modelu pro stejnou skokovou změnu výkonové hladiny ze 100 % na 50 %. Ověření parametrů na plném nelineárním modelu je logickým krokem, abychom ověřili chování navrženého fuzzy algoritmu nejen na lineárním modelu, který je vždy jen zjednodušením v určitých pracovních bodech a jeho blízkém okolí, a proto se nemusí přesně shodovat v dynamice a nutně nemusí pokrývat celý rozsah změn výkonové hladiny. Právě při tomto ověření bylo zjištěno, že průběh výstupní teploty  $T_{vT}$  odpovídá výsledkům z lineárního modelu a pohybuje se v požadované toleranci, nicméně vykazuje malé oscilace kolem žádané hodnoty.

Tab. 11: Získané parametry z optimalizačních úloh pro skokovou změnu výkonu 100 - 50 %

|                                      | S      | SI SII |        | VP     |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                      | IN     | OUT    | IN     | OUT    | IN     | OUT    |
| původní $K_{\scriptscriptstyle uPI}$ | 0,005  | 0,02   | 0,002  | 0,07   | 0,003  | 0,04   |
| SADA1 $K_{_{uPI}}$                   | 0,0051 | 0,0642 | 0,0031 | 0,0797 | 0,0013 | 0,0825 |
| SADA2 $K_{uPI}$                      | 0,0052 | 0,055  | 0,0042 | 0,0744 | 0,0012 | 0,0680 |

Vyšší hodnoty parametrů  $K_{uPI-SI-OUT}$  a  $K_{uPI-VP-OUT}$  (v tabulce červenou barvou) oproti počátečnímu nastavení získané v optimalizačních úlohách mají vliv na snížení amplitudy podkmitů, které jsme mohli pozorovat na předchozích obrázcích, ale za cenu vyšších oscilací, které je třeba kompenzovat úpravou zbývajících čtyř parametrů fuzzy PI regulátorů (tab. 10, modrá barva) na výstupním přehříváku VP. Více o analýze těchto parametrů je uvedeno v následující kapitole 6.6.2.

Druhým logickým krokem je ověření sady parametrů na jiné než skokové změny výkonu a ověření, zda dokáže takto navržený fuzzy algoritmus pokrýt i tyto požadavky. Jak bylo uvedeno v úvodu kapitoly 6.5, pro experiment byla vybrána trendová změna výkonové hladiny z 50 % na 100 % s trendovou rychlostí 10 MWt za 60 s, která pokrývá opět celý rozsah a je opačným extrémem ke skokovým změnám provozních režimů. I zde byla provedena optimalizační úloha z počátečního stavu daného předchozí kapitolou 6.4 (tab. 10). Na obrázku obr. 6-20 je odezva výstupní teploty  $T_{VT}$  pro

jednotlivé iterační kroky optimalizační úlohy. Červenou barvou je označen počáteční stav simulovaný nelineárním modelem. Modrou barvou jsou zobrazeny jednotlivé průběhy optimalizace na linearizovaném modelu.

Abychom nalezli kompromisní řešení mezi oběma typy operačních režimů<sup>12</sup> 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 (tab. 11). V tabulce tab. 12 jsou uvedeny výsledné parametry pro trendovou změnu výkonu, které se téměř shodují s parametry získanými pro skokovou změnu výkonu. Mimo optimalizační úlohu je provedeno doladění zbývajících čtyř parametrů výstupního přehříváku VP (v tabulce označeno modrou barvou), které bylo provedeno s ohledem na potlačení oscilací dle následující kapitoly 6.6.2. Takto získané kompromisní řešení je ověřeno simulačními experimenty jak na skokové, tak trendové změně výkonu.



Obr. 6-20: Optimalizace parametrů SI, SII a VP – průběh teploty  $T_{VT}$  na výstupu VP – trendová změna výkonu 50-100 %

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Rozumíme tím skokové a trendové změny najíždění a sjíždění tepelného výkonu

|                   | SI    |        | SII    |        | VP     |       |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                   | IN    | OUT    | IN     | OUT    | IN     | OUT   |
| K <sub>e</sub>    | 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 <sub>uPI</sub>  | 0,005 | 0,06   | 0,002  | 0,07   | 0,0009 | 0,075 |

Tab. 12: Získané parametry z optimalizační úlohy pro trendovou změnu výkonu 100 - 50 %

Na obr. 6-21 je zobrazeno porovnání odezev teploty výstupní páry  $T_{vT}$ výstupního přehříváku VP před a po optimalizaci jako reakce na skokovou změnu výkonové hladiny ze 100 % na 50 %. Červenou barvou je reprezentován výchozí průběh před optimalizací minimalizačním kritériem z obr. 6-10 s parametry dle tab. 10 simulačně vypočítaný na komplexním nelineárním modelu. Průběhy označené modrou barvou reprezentují odezvy teploty  $T_{vT}$  v optimalizační úloze realizované na lokálně linearizovaném modelu. Konečně černou barvou je reprezentována odezva teploty  $T_{vT}$ simulována na nelineárním modelu jako výsledku optimalizační úlohy s výslednými parametry uvedenými v tab. 12. Významné porovnání s průběhem získaným původním PI řídicím obvodem naleznete v kapitole 7.





Na obr. 6-22 je zobrazeno porovnání odezev teploty výstupní páry  $T_{VT}$ výstupního přehříváku VP před a po optimalizaci jako reakce na trendovou změnu výkonové hladiny z 50 % na 100 %. Porovnání s průběhem získaným původním PI řídicím obvodem naleznete v kapitole 7. Lze konstatovat, na základě obou prezentovaných grafů, že realizací minimalizačního kritéria parametrů fuzzy PI regulátorů 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. 6-22:** Výsledné porovnání optimalizace – odezva  $T_{VT}$  na trendovou změnu výkonu

## 6.6 Klasifikace výsledků – Fuzzy Pattern klasifikace

#### 6.6.1 Popis klasifikační metody

Vzhledem k velkému množství dat získaných z optimalizačních úloh není snadné objektivně posoudit, který ze získaných průběhů, a tedy jaká kombinace parametrů fuzzy regulátorů, přináší nejlepší výsledky řízeného procesu. Samozřejmě lze s jistou dávkou zkušeností posoudit subjektivně (pohledem) na grafický výstup, časový průběh teploty přehřáté páry, zda je daný průběh horší či lepší než průběh získaný původní PI regulací, či zda je počáteční průběh optimalizační úlohy kvalitativně horší než průběh získaný po optimalizační úloze. Kritéria kvality popsaná běžným, lingvistickým jazykem jsou jednoznačná. Získat takový průběh teploty přehřáté páry, jenž se bude pohybovat v tolerančním pásmu, nebude mít velký překmit a nebude výrazně kmitavý. Nicméně převést tento vágní slovní popis na konkrétní ohodnocení číselnou hodnotou (např. v rozsahu 0 až 1) a uplatnit nějakou objektivní systematickou automatickou metodu není tak jednoduché. Jako nástroj pro klasifikaci získaných dat jsem si vybral metodu Fuzzy Pattern klasifikace [**41**].

Zvolená metoda je použita z důvodu uskutečnění v pořadí již druhé zahraniční stáže na TU Chemnitz v Německu, kde jsem měl možnost pracovat se softwarem LOKALIMO, pracujícím na principech Fuzzy Pattern klasifikace, vyvinutým týmem profesora S. F. Bocklische na katedře Systémové teorie ("Professur Systemtheorie") na Fakultě elektrotechniky. Tento program jsem dostal k dispozici a mohl jsem s jeho pomocí otestovat mnou získaná data.

Teoretický rámec poskytuje fuzzy matematika. Klasifikační metody slouží k třídění empirických dat do konečného počtu tříd pomocí funkcí z předem vymezených funkčních systémů. Výběr klasifikační funkce z daného funkčního systému se provádí na základě omezeného počtu dat se známou příslušností do tříd postupem, který se obecně označuje jako učení a který může mít rozmanitou podobu, od poměrně triviálních jednokrokových výpočtů až po velmi složité iterační algoritmy. Tradiční klasifikační metody pracují na statistických principech. S rozvojem počítačů a růstem jejich výkonu vedl k rozvoji klasifikačních metod založených na principech strojového učení, např. klasifikace pomocí umělých neuronových sítí, či využití tzv. jádrových

funkcí. Pokud chceme tento popis zobecnit a aplikovat na náš problém, můžeme vycházet z anglického originálu, kde se používá pojmu "pattern recognition", což jsou metody analýzy a klasifikace dat, založených na principu matematického popisu vlastností reálného objektu, v našem případě časového průběhu teploty, jehož stav chceme hodnotit např. vektorem hodnot (stupněm příslušnosti). Anglické slovo "pattern" znamenající především "vzor, schéma, předloha, šablona" evokuje rozpoznávání dat na základě zvolených etalonů, tedy vzorů, kterým můžeme objektivně přisoudit referenční hodnotu popsanou stupněm příslušnosti (kvalitní průběh = 1, nekvalitní průběh = 0). Referenční hodnotou pro nás mohou být jak kvalitní, tak nekvalitní průběhy teploty přehřáté páry a software LOKALIMO hodnotí na jejich základě ostatní průběhy.

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 % s trendem 10 MWt za 60 s, výdrž 300 s a snížení výkonu ze 100 % na 50 % opět s tendencí 10 MWt za 60 s. K dispozici tak bylo 48 časových průběhů teploty přehřáté páry  $T_{VT}$  pro různá nastavení parametrů fuzzy PI regulátorů (viz Příloha B). Abychom s těmito daty mohli pracovat v klasifikační úloze a programu LOKALIMO, byla aproximována polynomem 12. řádu pomocí funkce "polyval" v prostředí MATLAB. Na obr. 6-23 jsou dva příklady aproximace průběhu výstupní teploty vstupující do klasifikační úlohy. Vstupem do klasifikační úlohy jsou parametry aproximační funkce. Abych zachoval rozumnou dobu výpočtu a potřebnou přesnost, použil jsem první tři parametry polynomu p0, p1 a p2, kterými lze dostatečně popsat kvalitu průběhu. Nejprve jsem zvolil z daného setu experimentů 8 průběhů (tab. 13), z nichž dva jsem subjektivně posoudil jako nekvalitní, a to záměrně z důvodu velké amplitudy překmitu č. 33 a z důvodu velkého kmitání č. 44, viz obr. 6-24. Oba tyto jevy jsou v našem regulovaném systému nežádoucí. Že se nejedná pouze o subjektivní posouzení, je vidět na obr. 6-25, resp. obr. 6-26, kde je graf závislosti parametrů p0/p1 a p1/p2 z tab. 13. Na těchto grafech lze vidět, že jsou tyto tři parametry schopny dostatečně popsat průběh. Je zřejmé, že parametry experimentů č. 44 a 33 jsou na okraji závislostí mimo hlavní oblast parametrů. První návrh ohodnocení kvality jednotlivých průběhů vyjádřený stupněm příslušnosti potenciální funkce v třírozměrném prostoru vstupních parametrů softwarem LOKALIMO je uveden v posledním sloupci v tab. 13.

| p12*x^12 + p1                             |           |          |            |                                 |  |
|---|-----------|----------|------------|---------------------------------|--|
| experiment č.                             | p2        | р1       | <b>р</b> 0 | Stupeň<br>příslušnosti<br>[0-1] |  |
| 5   | -9,01E-05 | 0,018216 | 574,4583   | 0,6601                          |  |
| 10  | -8,36E-05 | 0,018581 | 574,4233   | 0,6958                          |  |
| 12  | -6,18E-05 | 0,014394 | 574,5821   | 0,6072                          |  |
| 31  | -7,08E-05 | 0,013462 | 574,666    | 0,5635                          |  |
| 37  | -6,80E-05 | 0,013554 | 574,6462   | 0,7421                          |  |
| 41  | -6,86E-05 | 0,013855 | 574,6367   | 0,8016                          |  |
| subjektivně posouzené nekvalitní průběhy: |           |          |            |                                 |  |
| 33  | -0,00023  | 0,041432 | 573,5782   | 0,0181                          |  |
| 44  | -5,44E-05 | 0,008348 | 574,8258   | 0,1434                          |  |

Tab. 13: Parametry aproximačních funkcí



Obr. 6-23: Aproximace průběhu výstupní teploty  $T_{VT}$  – průběh č. 5 a č. 31



Obr. 6-24: Subjektivní posouzení nekvalitních průběhů č. 33 a č. 44



Obr. 6-25: Rozložení závislosti parametrů aproximační funkce p0/p1



Obr. 6-26: Rozložení závislosti parametrů aproximační funkce p1/p2

Nejlepšího ohodnocení se dostalo experimentu č. 41, který je ohodnocen stupněm příslušnosti 0,8016, zatímco experimenty č. 33 a č. 44, ohodnocené subjektivně špatně, získaly hodnotící koeficient pouze 0,0181 a 0,1434. Na obr. 6-27 je zobrazeno všech osm průběhů, které jsme hodnotili, a lze konstatovat, že průběh č. 41 (černá barva) je skutečně z daného setu nejkvalitnější a kompromisem mezi průběhy s velkými překmity a oscilujícími průběhy.



Obr. 6-27: Porovnání první sady 8 průběhů

V dalším kroku jsem provedl klasifikaci všech 48 experimentů, do které jsem zařadil i nastavení původní PI regulace. Na obr. 6-28 je graf vyhodnocení. (*Příloha B - tabulka ohodnocení je k dispozici viz přiložené CD*). Vyhodnocení bylo realizováno pro 2 alternativní třídy potenciálních funkcí, první sestavena z 6 objektů (v grafu označena jako Güte KR01) a druhá ze 13 objektů (Güte KR02). Obě varianty přináší podobné výsledky, ale například experiment č. 24 má v první třídě hodnocení 0,6171 a ve druhé třídě pouze 0,0952, což je velká diference. Pokud se podíváme na porovnání s dobrým průběhem č. 41 a špatným č. 44, viz obr. 6-29, lze jednoznačně říci, že blíže k reálnějšímu odhadu má třída KR01 a její přiřazení ohodnocení 0,6171. Na základě vyhodnocení i v dalších experimentech (např. č. 8 a č. 12) jsem zvolil třídu KR01 jako akceptovatelnější pro hodnocení průběhů. Tuto klasifikaci lze ale využít i v další analýze průběhů a jejich závislosti na parametrech fuzzy PI regulátorů.



Obr. 6-28: Vyhodnocení kvality 48 experimentů pro dvě potenciální funkce



Obr. 6-29: Určení vhodné varianty třídy potenciální funkce

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

Pokud se blíže podíváme na obr. 6-29 a porovnáme průběhy č. 44 (velmi kmitavý, tj. špatný) a č. 41 (momentálně z dané sady nejlepší) a porovnáme, za jakých parametrů fuzzy PI regulátorů bylo těchto výsledků dosaženo (viz *Příloha B*), zjistíme, že z 18 parametrů se liší pouze dva, a to v kaskádní struktuře výstupního přehříváku, konkrétně parametry vnitřního regulátoru  $K_{uPI} \sim IN u$ , druhý parametr je ve vnějším regulátoru  $K_{\Delta e} \sim OUT de$  a to konkrétně v tab. 14.

|                 | špatné nastavení č. 44 | dobré nastavení č. 41 |
|-----------------|------------------------|-----------------------|
| Parametr IN u   | 0,0005                 | 0,0009                |
| Parametr OUT de | 100                    | 10                    |

Tab. 14: Porovnání parametrů pro experiment č. 44 a č. 41

Tato skutečnost vede na myšlenku podobnou citlivostní analýze. 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 cyklicky měnil tyto parametry v daném intervalu, viz tab. 15.

|                 | rozsah                   | počet kroků |
|-----------------|--------------------------|-------------|
| Parametr IN u   | 0,0005 : 0,0001 : 0,0009 | 5           |
| Parametr OUT de | 100 : -10 : 10           | 10          |

Tab. 15: Rozsahy parametrů pro sadu experimentů

Parametry byly měněny s krokem v rozsahu dle tab. 15, aby hodnoty parametrů postupně přešly z nastavení horšího směrem k lepšímu, viz obr. 6-30. Dle tab. 15 jsem vygeneroval 50 simulací, a dále byla tato sada simulací doplněna o dalších 12 experimentů (označeno modře, viz obr. 6-30) v okolí cílového nastavení č. 41. Celkem bylo tedy získáno 62 experimentálních simulací, které byly ohodnoceny, viz (*Příloha B - tabulka je k dispozici viz přiložené CD*).



Obr. 6-30: Sada parametrů pro nové experimenty z č. 44 do č. 41

Na obr. 6-31 je zobrazen výsledek ohodnocení kvality experimentů pomocí potenciální funkce třídy Güte KR01. Lze pozorovat, že pozitivní ohodnocení získaly průběhy až od č. 41 výše (v novém číslování), což odpovídá průběhům v blízkosti námi hodnoceného dobrého průběhu č. 41. Lépe je znázorněno rozložení ohodnocení vůči parametrům z obr. 6-30 na obrázcích obr. 6-32 a obr. 6-33, kde je vidět, že 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. Naopak nepříjemností je, že při dalším zmenšování z hodnoty 10 níže, kvalita opět klesá. Hlavní vliv na oscilace průběhu výstupní teploty přehřáté páry  $T_{VT}$  má tedy parametr  $K_{\Delta e} \sim OUT de$ , což potvrzuje podobnosti fuzzy PI a klasických PID regulátorů (D složka) diskutovaných v kapitole 4.3.



Obr. 6-31: Ohodnocení nové sady 62 experimentů







Obr. 6-33: Závislost parametrů *IN u* a *OUT de* na ohodnocení kvality - 3D

Stejně tak se můžeme zaměřit na druhé srovnání, a to průběh s relativně velkým překmitem č. 33 (obr. 6-24) a naší referencí č. 41 (obr. 6-27), kde lze analyzovat další vazby a závislosti parametrů fuzzy PI regulátoru. Na rozdíl od dvoudimenzionální úlohy  $IN u \times OUT de$  se v tomto případě při pohledu viz *Příloha B*, odlišují čtyři parametry

fuzzy PI regulátorů, viz tab. 16. Parametr z předchozího případu *OUT de* se neliší a má konstantní hodnotu 10 a parametr *IN u* tentokráte mění hodnotu ve větším rozmezí než v prvním případě. Další sada experimentů vznikla provedením simulačních experimentů při změně parametrů s daným krokem v rozsahu, viz tab. 17, a bylo tak získáno 192 simulovaných průběhů teploty přehřáté páry (*Příloha B - tabulka je k dispozici viz přiložené CD*). Z analýzy těchto dat bylo zjištěno, že na průběhy mají vliv kombinace všech 4 parametrů, které dále rozebereme.

|                | špatné nastavení č. 33 | dobré nastavení č. 41 |
|----------------|------------------------|-----------------------|
| Parametr IN de | 50                     | 100                   |
| Parametr IN e  | 0,15                   | 0,75                  |
| Parametr IN u  | 0,0002                 | 0,0009                |
| Parametr OUT u | 0,1                    | 0,0075                |

Tab. 16: Porovnání parametrů pro experiment č. 33 a č. 41

| νı             | 1                          | 1           |
|----------------|----------------------------|-------------|
|                | rozsah                     | počet kroků |
| Parametr IN de | 50:25:125                  | 4           |
| Parametr IN e  | 0,15:0,3:1,05              | 4           |
| Parametr IN u  | 0,0002 : 0,00035 : 0,00125 | 4           |
| Parametr OUT u | 0,1 : -0,025 : 0,0050      | 3           |

Tab. 17: Rozsahy parametrů pro další sadu experimentů

Na obr. 6-34 je porovnání 3krát 16 průběhů, kde v každém z těchto tří grafů jsou průběhy experimentů s parametry *IN de* a *IN e* proměnnými v intervalech z tab. 17. Zbývající parametry *IN u* a *OUT u* jsou v experimentu nastaveny na jinou konstantní hodnotu a výsledky zobrazeny viz obr. 6-34. Ze všech tří grafů a v nich totožných průběhů by se mohlo jevit, že změna těchto parametrů nemá žádný významný vliv. Pokud si ale data zanalyzujeme podrobněji, tak zjistíme, že se jedná o "šťastnou" kombinaci a jednotlivé parametry silně ovlivňují výsledné průběhy.



Obr. 6-34: Porovnání průběhů pro různé parametry IN de a IN e

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. 6-35. 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. 6-36. Doporučením je používat vyšší hodnotu parametru IN de.
- 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. 6-37.

- 3. *IN e* jeho různé hodnoty z tab. 17 nemají téměř vliv a simulované průběhy jsou téměř identické, viz obr. 6-38. 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. 6-39



Obr. 6-35: Analýza IN de - porovnání vlivu na oscilace







Obr. 6-37: Analýza IN u - porovnání vlivu na překmit







Obr. 6-39: Analýza OUT u - porovnání vlivu na velikost překmitu

Nyní analýzu parametrů porovnáme s výsledky ohodnocení jednotlivých experimentů pomocí Fuzzy Pattern klasifikace softwarem LOKALIMO (*Příloha B - tabulka je k dispozici viz přiložené CD*), obr. 6-40. Můžeme pozorovat, že ohodnocení se v určitém intervalu opakuje a výsledky jsou v daných úsecích totožné. Je to dáno cyklem zadávání parametrů do jednotlivých experimentů. Seřazením výsledků od nejlepších po nejhorší a porovnáním s výsledky analýzy parametrů je vidět jasná shoda a následující souvislosti.



Obr. 6-40: Výsledky klasifikace 192 experimentů

Odezvy teploty získané simulací systému a regulačního obvodu s parametrem *IN u* = 0,0002 fuzzy PI regulátoru vnitřní smyčky výstupního přehříváku, viz obr. 6-41, (souhlasí s bodem č. 2 - velká amplituda překmitu uprostřed průběhu v intervalu <+3 °C; -3,5 °C>, 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. 6-36) 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 <+1,5 °C; -2,5 °C>, bez oscilací na konci průběhu), viz obr. 6-42.



Obr. 6-41: Průběhy v pořadí 145-192



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. 6-43. Více vypovídající než obr. 6-40 je 3D zobrazení, 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, obr. 6-44.



**Obr. 6-43:** Nejlépe hodnocené průběhy odezvy teploty  $T_{VT}$ 



Obr. 6-44: Závislost OUT u a IN u na libovolné kombinaci IN de a IN e

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. 6-44 je zobrazena část výsledků (48) pro různé kombinace *IN de* a *IN e*. Kompletní zobrazení výsledků (192 experimentů) ve 3D grafice je v (*Příloha B*).

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.

## 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 6.4 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. Fuzzy regulační systém byl navržen dle kapitoly 6.5 s optimalizovanými parametry dle tab. 12. Na obr. 7-1 je porovnání odezvy teploty na výstupním přehříváku  $T_{VT}$ . Ostatní významné měřené teploty na vstupech a výstupech přehříváků Šoty I. a II. jsou uvedeny na obr. 7-2. Odezvy získané na nelineárním modelu ve spolupráci s fuzzy regulačním systémem jsou mnohem hladší a nevykazují takové oscilace jako původní PI řídicí systém.

To je patrné i na průběhu akčních zásahů, tedy otevření vstřikovacích ventilů, viz obr. 7-3. Otevírání 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.



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 odezvy významných měřených teplot pro původní PI a fuzzy PI regulaci při skokové změně výkonové hladiny



Obr. 7-3: Porovnání průběhů akčních zásahů – vstřikovacích ventilů V1, V2 a V3

## 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 z 50 % na 100 % rychlostí 10 MWt za 60 s, dále je držena 300 s na hladině 100 % a následně se vrací stejnou rychlostí zpět na původních 50 %. V rámci experimentu je pokryt celý rozsah výkonové hladiny (50 % až 100 %), po který je vyráběna elektrická energie. Experiment může odpovídat provoznímu režimu. Fuzzy regulační systém opět vychází z kapitoly 6.5 s optimalizovanými parametry dle tab. 12. Časový průběh změny výkonové hladiny je uveden společně s porovnáním odezev teploty  $T_{VT}$  původní PI regulace a fuzzy regulace na obr. 7-4. Fuzzy regulace se pohybuje v intervalu ±1 °C oproti ±2,5 °C původní PI regulace. Ostatní významné měřené teploty na vstupech a výstupech přehříváků Šoty I. a II. jsou uvedeny na obr. 7-5. Reakce akčních zásahů – poloha vstřikovacích ventilů je na obr. 7-6.



Obr. 7-4: Porovnání odezvy teploty  $T_{VT}$  původní PI a fuzzy PI regulace na trendovou změnu výkonové hladiny 50 % – 100 % – 50 %



Obr. 7-5: Porovnání odezvy významných měřených teplot pro původní PI a fuzzy PI regulaci při trendové změně výkonové hladiny


Obr. 7-6: Porovnání průběhů akčních zásahů – poloha vstřikovacích ventilů V1, V2 a V3

# 7.1.3 Reakce na trendovou změnu výkonové hladiny z 90 % na 70 %

V této podkapitole uvádím reakci teploty  $T_{vT}$  fuzzy PI regulace a původní PI regulace na menší změny tepelného výkonu. Tato situace simuluje pokles tepelného výkonu z hladiny 90 % na 70 % s trendem 10 MWt za 60 s. Na obr. 7-7 je porovnání odezvy teploty  $T_{vT}$  a na obr. 7-8 je porovnání průběhů otevření vstřikovacích ventilů.



Obr. 7-7: Porovnání odezvy teploty  $T_{VT}$  původní PI a fuzzy PI regulace na trendovou změnu výkonové hladiny 90-70 %





#### 7.2 Ověření vlastností chování při změně dynamiky soustavy

Je třeba připomenout, že navržený proces optimalizace parametrů fuzzy regulátorů a získané výsledky regulačních pochodů byly realizovány na zvoleném modelu procesu přehřevu páry a tím i na dané dynamice procesu. Z hlediska implementace regulačních algoritmů je významná otázka, jak se změní regulační pochody, bude-li změněna dynamika procesu příhřevu páry? Proto je nedílnou součástí této práce ověření vlastností regulačních pochodů při změněné dynamice soustavy.

Cílem této podkapitoly je ověření robustnosti fuzzy algoritmu, při kterém je testována odezva fuzzy algoritmu na změnu dynamiky soustavy. Fuzzy algoritmus byl navržen a testován na linearizovaném i nelineárním modelu přehřevu páry. I přesto, že byl nelineární model verifikován na základě reálných provozních dat, tak se při modelování samozřejmě jedná o zjednodušení reality a při případné implementaci na reálném zařízení může nastat situace, při které reálná soustava vykazuje jiné dynamické vlastnosti při zachování požadavků na statické vlastnosti soustavy, než pro jaké byl algoritmus navržen. Tepelné výměníky použité v technologii jsou tvořeny soustavou železných trubek o hustotě materiálu  $\rho_{Fe} = 7800 \text{ kg/m}^3$ . Vlivem vysokých teplot, působením páry a změn skupenství voda/pára, spalin apod. dochází k zanášení povrchu trubek, což koresponduje se situací, kdy dojde ke změnám dynamiky soustavy.

Nejsnadnějším způsobem jak docílit změny dynamiky soustavy je tedy 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. 7-9 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. 7-10 jsou vzájemná porovnání reakcí fuzzy PI a původní PI regulace pro jednotlivé systémy s různou dynamikou.



Obr. 7-9: Odezva fuzzy PI a původní PI regulace na změny dynamiky 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 spalinách

Fuzzy regulační systém byl dosud testován na změny běžných operačních režimů, pod kterými rozumíme sjíždění a najíždění tepelného výkonu na různé výkonové hladiny. Dále byla testována jeho odolnost na změnu dynamiky soustavy, kterou můžeme označit jako robustnost vůči změnám uvažovaného modelu. Ukázalo se, že vykazuje lepší robustnost než původní řídicí systém. Dalším testem je ověření chování při poruše na spalinách. 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.

První experiment modeluje situaci, kdy systém je na konstantní výkonové hladině 70 % a v čase t = 1000 s dojde ke skokové změně dodávaného tepla do Šoty I. o 20 % po dobu 120 s. obr. 7-11 ilustruje porovnání odezvy teploty  $T_{VT}$  původní PI regulace a fuzzy PI regulace. Zajímavá je z hlediska regulace reakce vstřikovacího ventilu *V3*, který při vstupu poruchy téměř okamžitě reaguje, oproti pozdější reakci původní PI regulace. Průběhy generovaných akčních zásahů na vstřikovacím ventilu *V3* jsou uvedeny na obr. 7-12.

Druhý experiment modeluje situaci, kdy nastane posloupnost poruch dodávaného tepla ze spalin na všech třech přehřívácích. V čase t = 50 s je simulována porucha spalin na Šoty I. o +30 % s periodou 120 s, v čase t = 1000 s je simulována porucha spalin na Šoty II. o -20 % s periodou 120 s, a konečně v t = 2000 s je simulována porucha spalin na VP o +5 % s periodou 120 s. Obr. 7-14 ilustruje porovnání odezvy teploty  $T_{VT}$  původní PI regulace a fuzzy PI regulace na posloupnost poruch dodávaného tepla spalin do Šoty I, Šoty II. a VP, viz obr. 7-13. 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. 7-11: Porovnání fuzzy PI a původní PI regulace – změna dodávaného tepla spalin Šoty I. +20 %



Obr. 7-12: Reakce akčního zásahu – vstřikovacího ventilu V3 od času t = 1000 s



Obr. 7-13: Posloupnost poruch tepla ze spalin Šoty I. +30 %, Šoty II. -20 %, VP +5 %



odezva systému při poruše na spalinách na Šotu I. +20% při tepeleném příkonu 70%

Obr. 7-14: Porovnání fuzzy PI a původní PI regulace na posloupnost poruch tepla ze spalin

### 7.4 Přepínání parametrů fuzzy PI regulátoru

Ze simulačních experimentů je zřejmé, že fuzzy regulace přináší určitá zlepšení. V celém rozsahu je dodržena tolerance 575±2 °C. Možnost dalšího snížení tolerancí kolem žádané hodnoty výstupní teploty přehřáté páry je motivací nejen pro návrháře regulace, ale především pro odběratele. Vliv překročení tolerancí se projevuje na životnosti turbíny a neumožnuje tak uvažovat nad posunutím teplot na vyšší hladiny pro dosažení vyšších účinností. Toto se bezprostředně projevuje v nákladech na výrobu elektrické energie. Některé výsledky z fuzzy regulace z provozního hlediska obsahují viditelné tlumené kmity a jim odpovídající změny vstřiku. Nabízí se otázka, zda zavedením množiny fuzzy regulátorů a fuzzy algoritmu přepínání nepovede k vyhlazení regulačních pochodů? Jednou z možností, jak ještě zlepšit kvalitu regulace, je implementace množiny regulátorů pro jednotlivé výkonové hladiny a jejich přepínání vzávislosti na aktuální výkonové hladině. Je tedy nutno nejdříve ověřit základní myšlenku přepínání a její možný přínos experimentálně na průtočném kotli **[V8], [V9]**. Přepínané fuzzy regulátory jsou vytvořeny za následujících zjednodušení a předpokladů:

- Fuzzy regulátory na zvolených výkonových hladinách jsou stabilní,
- uvažujeme pouze změny zesílení parametrů fuzzy PI regulátoru,
- změna parametrů je po částech spojitá funkce,
- nejsou zahrnuty poruchy.

Pokud předpokládáme, že je možno aproximovat mezi dvěma sousedícími výkonovými hladinami parametry fuzzy PI regulátoru přímkou, pak je možno spojitě měnit, přepínat parametry fuzzy regulátoru v závislosti na výkonu.

Vzhledem ke složitosti celého procesu ohřevu páry v kaskádní regulaci se zaměříme pouze na výstupní přehřívák VP. Podle výkonu bude přepínán regulátor vnější smyčky F-PI-5 viz obr. 6-1, regulátor vnitřní smyčky F-PI-6 přepínán nebude. Základní informaci o možnostech fuzzy regulátorů s proměnnými zesíleními podle výkonu je možno získat tak, že nalezneme vhodné seřízení (trojici parametrů) na výkonové hladině 50 % a vhodné seřízení pro hladinu 100 %. Při změně výkonové hladiny při provozním režimu budeme mezi těmito regulátory lineárně přepínat.

Předpokládáme v prvním experimentu lineární závislost parametrů na výkonové hladině a parametry fuzzy PI regulátoru  $K_{e6}, K_{\Delta e6}, K_{uPI6}$  lze zapsat ve tvaru:

$$K_{e6} = \chi_{e6} \Omega_{cel} + \beta_{e6}$$

$$K_{\Delta e6} = \chi_{\Delta e6} \Omega_{cel} + \beta_{\Delta e6}$$

$$K_{uPI6} = \chi_{uPI6} \Omega_{cel} + \beta_{uPI6}$$
(7.1)

kde  $\chi_{x6}$ ,  $\beta_{x6}$  jsou konstanty a  $\Omega_{vel}$  je aktuální výkonová hladina tepelného výkonu. Uvažujme dvě "optimální" nastavení fuzzy PI regulátoru F-PI-5: pro výkonovou hladinu 50 % a 100 %, které bylo nalezeno pomocí optimalizační úlohy, viz tab. 18. Na obr. 7-15 je zobrazen průběh výstupních teplot pro trendovou změnu výkonové hladiny z 50 % na 100 %. Průběh *fuzzy100* je odezva systému na nastavení fuzzy regulátoru s parametry pro 100 % výkonovou hladinu. Tyto parametry jsou pevné a nezávislé na změnu výkonové hladiny. Můžeme pozorovat, že výkon 100 % dosáhneme v cca t = 1700 s, a od tohoto času je průběh výstupní teploty *fuzzy100* velmi dobrý. Ale začátek průběhu, kdy je výkonová hladina 50 %, velmi osciluje. Opačné vlastnosti má průběh *fuzzy50*, který na počátku simulace při výkonu 50 % má sice větší amplitudu, ale nekmitá. Konec průběhu je ale horší než pro nastavení *fuzzy100*. Odezva přepínaného fuzzy regulátoru *fuzzy50-100* je kvalitnější v celém rozsahu sledovaných změn výkonové hladiny.

| Parametry pro F-PI-5 | K <sub>e6</sub> | $K_{_{\Delta e 6}}$ | K <sub>uPI6</sub> |
|----------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| 50 %                 | 0,11            | 25                  | 0,1               |
| 100 %                | 0,2             | 10                  | 0,15              |

Tab. 18: Parametry F-PI-5 pro 50 % a 100 %



Obr. 7-15: Trendová změna výkonové hladiny 50 % – 100 % a odezvy jednotlivých nastavení fuzzy regulátorů

Další experiment je realizován pro najíždění i sjíždění výkonu na úrovni 50 % – 100 % – 50 %. Průběh odezvy teploty je na obr. 7-16. Z obrázku je patrné, že přepínané regulátory dávají regulační pochody v celém výkonovém rozsahu dostatečně kvalitní, ale s tlumenými kmity, které leží v požadované toleranci. Abychom získali přehled o možnostech takto získaných výsledků v porovnání s průmyslově dodávanými systémy regulace přehřáté páry a jednoduchou<sup>13</sup> fuzzy PI regulací, uvádím ještě regulační pochody na obr. 7-17. Dosažené zlepšení přepínaného fuzzy regulátoru oproti fuzzy PI a hlavně původní PI regulaci je evidentní. Průběhy akčních veličin pro přepínané fuzzy regulátory a pro původní PI regulátory jsou na obr. 7-18.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Ve smyslu neměnných parametrů fuzzy regulátoru v závislosti na výkonu.



Obr. 7-16: Trendová změna výkonu z 50 % na 100 % a zpět po 18 minutách



Obr. 7-17: Porovnání přepínaných fuzzy regulátorů, jednoduchých fuzzy PI a původní PI regulace



Obr. 7-18: Porovnání akčních zásahů - otevření vstřikovacích ventilů - přepínaná fuzzy regulace a původní PI regulace

Na základě provedených simulačních experimentů s přepínáním je možno konstatovat, že přepínání mezi fuzzy regulátory, které jsou navrženy pro zvolené výkonové hladiny, tvoří ještě další potenciál pro zlepšení kvality regulace. Návrh přepínané fuzzy regulace však již není předmětem této práce.

#### 7.5 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. Navržený systém fuzzy regulátorů umožňuje zjednodušit strukturu implementace tak, že se pro vlastní řízení využije pouze struktura, viz obr. 7-19. Výpočetně nejnáročnější část "Fuzzy Logic Controller" (FLC) se nahradí dvourozměrnou tabulkou, k jejichž souřadnicím je přiřazena hodnota přírůstku akčního zásahu.



Obr. 7-19: Struktura náhrady FLC tabulkou

V tabulce jsou definovány nalezené přírůstky akčních zásahů  $\Delta u(k)$  pro kombinace měřených hodnot regulační odchylky e(k) a změny regulační odchylky  $\Delta e(k)$  v intervalu <-1;1> s relativně velkým krokem 0,2. Hodnoty tabulky jsou zobrazeny v 3D grafice na obr. 7-20.



**Obr. 7-20:** Závislost  $\Delta u(k)$  na e(k),  $\Delta e(k)$  - náhrada tabulkou

Lineární interpolace mezi naměřenými a tabulkovými hodnotami v intervalu se realizují procedurou *Lookup Table (2D)* v MATLAB Simulink. Porovnání průběhů regulačních pochodů v implementaci realizované tabulkou a blokem "Fuzzy Logic Controller" je na obr. 7-21. Je možno konstatovat, že zjednodušená implementace fuzzy regulátorů dává srovnatelné výsledky s úplnou implementací.



Obr. 7-21: 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

- 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 Prunéřov 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. 7-8, že pro simulované provozní režimy mají regulační pochody s fuzzy regulátory menší překmity 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 pomocí "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. 7-10.
      - Schopnosti fuzzy algoritmů při vyrovnání poruch na přiváděném teple je uvedena v kapitole 7.3. Regulační pochody jsou na obr. 7-11 až obr. 7-14.
        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 kapitola 7.4, které jsou seřízeny pro rozdílné výkonové hladiny, demonstruje ještě další možnosti zlepšování regulačních pochodů, viz obr. 7-15 až obr. 7-18.
- Možnosti zjednodušené implementace fuzzy regulátorů jsou uvedeny v kapitole 7.5. Nahrazení výpočetně nejnáročnější části fuzzy bloku "Fuzzy Logic Controller" dvourozměrnou tabulkou s lineární interpolací představuje výrazné zjednodušení implementace. Na obr. 7-21 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 kapitola 5.2, a vytvoření sítě lokálně lineárních modelů pro VT část v prostředí MATLAB Simulink, viz kapitola 5.3. 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 6.5. Jsou popsány dvě metody optimalizace parametrů, dle struktury technologie, viz kapitola 6.5.1, a podle teploty za výstupním přehřívákem, viz kapitola 6.5.2. Na obr. 6-11 až obr. 6-22 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:

- 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.
- Návrh a realizace množiny lokálně lineárních modelů v celém rozsahu výkonových hladin.
- 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.
- 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

- 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. Pokročié 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] HUBKA, L.; MODRLÁK, O.; TŮMA, L. Simulační model vysokotlakých přehříváků a jeho řízení. Komplexní obnova elektrárny Prunéřov II.- Etapa IV.. 2009.
- [11] ZADEH, L., A. Fuzzy Sets, Information and Control, vol. 8, s. 338-353, 1965.

- [12] 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.
- [13] SUGENO, M. *Industrial applications of fuzzy control*. Amsterdam, North-Holland: Elsevier Science Inc., 1985. 269 s. ISBN: 0444878297.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.

- [22] 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.
- [23] HUBKA, L. MODRLÁK, O. Model of dynamics of tubular heat exchanger, *Proceedings of 9th ICCC 2008*, s. 239-242, Sinaia, 2008. ISBN: 978973-746-897-0.
- [24] PASSINO, K. M. YURKOVICH, S. *Fuzzy control*, 1st ed. Addison Wesley, 1997.475 s. ISBN: 0-201-18074-X.
- [25] MACVICAR-WHELAN, P. J. Fuzzy sets for man-machine interaction, *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 8, no. 6, s. 687-697, 1976. ISSN: 0020-7373.
- [26] YESIL, E. Fuzzy Modelling and Control: soubor přednášek. [cit. 2014-02]
   [online]. Dostupný z WWW: <<u>http://www.et.tu-dresden.de/ifa/index.php?id=fmc</u>>
- [27] LEE, J. On methods for improving performance of PI-type fuzzy logic controllers, *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 4, s. 298-301, 1993. ISSN: 1063-6706.
- [28] MODRLÁK, O. Fuzzy řízení a regualce. Liberec: skripta. TUL, 2004. 27 s.
- [29] HRDLIČKA, A., Využití matlabu při návrhu fuzzy logického regulátoru, in Konference MATLAB, Brno, 2001, s. http://dpvchtcz/konference\_matlab/matlab01/hrdlickapdf.
- [30] BAUR, M. BOCKLISCH, S., F. Linear local models as local approximators, *IFAC symposium on system structure and control*, s. 615-620, 2001. ISSN: 1474-6670.
- [31] BAUR, M. BOCKLISCH, S. Similarity based local model approach for nonlinear modeling, *Proceedings of the 6th European Control Conference (ECC 01)*, s. 3905-3910, Porto. Portugal, 2001.
- [32] DAVIDOVÁ, O. Vliv funkce příslušnosti na průběh fuzzy regulace. Proceedings of XXVI. Seminar ASR'2001 "Instruments and Control". 2001. ISBN: 80-7078-890-9.

- [33] BIRD, R., B.; STEWART, E., W.; LIGHTFOOT, N., E. Přenosové jevy. Sdílení hybnosti, energie a hmoty. Praha: Academia, 1968. 799 s.
- [34] KALČÍK, J. Technická termodynamika. Praha: ČSAV, 1963. 565 s.
- [35] HUBKA, L. MENKINA, M. Control of tubular heat exchanger node in broad operation range, *Control of Power Systems 08*, s. 1-6, Bratislava. SVK, 2008. ISBN: 978-80-227-2883-6..
- [36] HUBKA, L. Temperature dynamic of heat exchangers in boilers, *Proceedings of the 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation 2010*, s. 1-5, Prague.
   CZ, 2010. ISBN: 978-80-01-04589-3.
- [37] TAKAGI, T. SUGENO, M. Fuzzy identification of system and its applications to modelling and control, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 1, s. 116-132, 1985. ISSN: 0018-9472.
- [38] VILIMEC, L. Provoz a regulace energetických zařízení. Ostrava: VŠB, 2007.
- [39] GEORGIOU, T. T. On the computation of the gap metric, *System & control letters*, vol. 11, no. 4, s. 253-257, 1998. ISSN: 0167-6911.
- [40] Matlab Help. [cit. 2014-duben] [online]. Dostupný z WWW: <<u>www.mathworks.com/</u>>
- [41] 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., Posssibilities of the control steam generator output temperature. In Proceedings of 9th International Carpathian Control Conference ICCC'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] OPALKA, 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 Internatoinal 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.

# Příloha A Přehled parametrů fuzzy PI regulátorů - optimalizace založená na maximálním využití vstupních intervalů

(tabulkové výstupy)

Tabulka hodnot parametrů z první optimalizace. V pořadí od nastavení parametrů fuzzy regulátorů pro Šoty I. pořadí č. 1-14 (první sloupec). Dále nastavení pro Šoty II., pořadí č. 15-21 (druhý sloupec). Nastavení pro VP, pořadí č. 22-33 (třetí sloupec)

| 1                                 | SI     |      |  |  |  |  |
|-----------------------------------|--------|------|--|--|--|--|
|                                   | IN OUT |      |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                    | 1      | 1    |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$                    | 1      | 1    |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 1      | 1    |  |  |  |  |
| 2                                 | S      | il i |  |  |  |  |
|                                   | IN     | OUT  |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                    | 0,1    | 0,11 |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$                    | 1      | 1    |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,01   | 0,05 |  |  |  |  |
| 3                                 | S      | 1    |  |  |  |  |
|                                   | IN     | OUT  |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                    | 0,8    | 0,65 |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                 | 10     | 50   |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,001  | 0,01 |  |  |  |  |
| 4                                 | SI     |      |  |  |  |  |
|                                   | IN OUT |      |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                    | 0,6    | 0,11 |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$                    | 1      | 1    |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,008  | 0,05 |  |  |  |  |
| 5                                 | S      | i    |  |  |  |  |
|                                   | IN     | OUT  |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                    | 0,1    | 0,07 |  |  |  |  |
| $K_{\scriptscriptstyle \Delta e}$ | 1      | 1    |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,008  | 0,05 |  |  |  |  |
| 6                                 | S      | 1    |  |  |  |  |
|                                   | IN     | OUT  |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                    | 0,1    | 0,05 |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                 | 1      | 1    |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,005  | 0,05 |  |  |  |  |
| 7                                 | SI     |      |  |  |  |  |
|                                   | IN OUT |      |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                    | 0,08   | 0,05 |  |  |  |  |
| $K_{\scriptscriptstyle \Delta e}$ | 2      | 4    |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,005  | 0,05 |  |  |  |  |

| 15               | SII   |        |  |  |
|------------------|-------|--------|--|--|
|                  | IN    | OUT    |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,18  | 0,2    |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2     | 5      |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,009 | 0,01   |  |  |
| 16               |       | SII    |  |  |
|                  | IN    | OUT    |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,15  | 0,17   |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2     | 7      |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,001 | 0,01   |  |  |
| 17               |       | SII    |  |  |
|                  | IN    | OUT    |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,1   | 0,1    |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2     | 7      |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,002 | 0,05   |  |  |
| 18               | SII   |        |  |  |
|                  | IN    | OUT    |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,05  | 0,1    |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 4     | 8      |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,002 | 0,07   |  |  |
| 19               | :     | SII    |  |  |
|                  | IN    | OUT    |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,06  | 0,11   |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 4,3   | 10     |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,002 | 0,07   |  |  |
| 20               |       | SII    |  |  |
|                  | IN    | OUT    |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,065 | 0,105  |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 4,5   | 11     |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,002 | 0,07   |  |  |
| 21               | SII   |        |  |  |
|                  | IN    | OUT    |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,065 | 0,1055 |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 4,4   | 10,5   |  |  |
| $K_{_{uPI}}$     | 0,002 | 0,07   |  |  |

| 22                                 | VP    |               |  |  |  |  |
|------------------------------------|-------|---------------|--|--|--|--|
|                                    | IN    | OUT           |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                     | 0,6   | 0,11          |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                  | 1     | 1             |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                       | 0,008 | 0,05          |  |  |  |  |
| 23                                 | VF    | •             |  |  |  |  |
|                                    | IN    | OUT           |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                     | 0,13  | 0,2           |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                  | 2     | 18            |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                       | 0,001 | 0,01          |  |  |  |  |
| 24                                 | VF    |               |  |  |  |  |
|                                    | IN    | OUT           |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                     | 0,8   | 0,65          |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                  | 10    | 50            |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                       | 0,001 | 0,01          |  |  |  |  |
| 25                                 | VP    |               |  |  |  |  |
|                                    | IN    | OUT           |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                     | 0,8   | 0,5           |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                  | 10    | 40            |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                       | 0,001 | 0,01          |  |  |  |  |
| 26                                 | VF    | •             |  |  |  |  |
|                                    | IN    | OUT           |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                     | 0,5   | 0,4           |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$                     | 10    | 30            |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                       | 0,001 | 0,01          |  |  |  |  |
| 27                                 | VF    |               |  |  |  |  |
|                                    | IN    | OUT           |  |  |  |  |
| $K_{_{e}}$                         | 0,5   | 0 <i>,</i> 35 |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                  | 20    | 25            |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                       | 0,001 | 0,01          |  |  |  |  |
| 28                                 | VP    |               |  |  |  |  |
|                                    | IN    | OUT           |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>                     | 0,5   | 0,35          |  |  |  |  |
| $K_{\scriptscriptstyle{\Delta e}}$ | 20    | 25            |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                       | 0,001 | 0,05          |  |  |  |  |

| 8                | S      | i -   |  |  |  |  |
|------------------|--------|-------|--|--|--|--|
|                  | IN OUT |       |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,06   | 0,07  |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 3      | 5     |  |  |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,005  | 0,05  |  |  |  |  |
| 9                | S      | il i  |  |  |  |  |
|                  | IN     | OUT   |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,05   | 0,07  |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2,5    | 5     |  |  |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,005  | 0,02  |  |  |  |  |
| 10               | S      | il 🛛  |  |  |  |  |
|                  | IN     | OUT   |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,04   | 0,09  |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2,5    | 8     |  |  |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,005  | 0,02  |  |  |  |  |
| 11               | SI     |       |  |  |  |  |
|                  | IN     | OUT   |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,036  | 0,1   |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2,5    | 7     |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$     | 0,005  | 0,02  |  |  |  |  |
| 12               | S      | il 🛛  |  |  |  |  |
|                  | IN     | OUT   |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,038  | 0,1   |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2,5    | 7,5   |  |  |  |  |
| K <sub>uPI</sub> | 0,005  | 0,02  |  |  |  |  |
| 13               | S      | il 🛛  |  |  |  |  |
|                  | IN     | OUT   |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,039  | 0,105 |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2,5    | 7,5   |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$     | 0,005  | 0,02  |  |  |  |  |
| 14               | SI     |       |  |  |  |  |
|                  | IN     | OUT   |  |  |  |  |
| K <sub>e</sub>   | 0,037  | 0,105 |  |  |  |  |
| $K_{\Delta e}$   | 2,5    | 7,5   |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$     | 0,005  | 0,02  |  |  |  |  |

| -                                 |           |      |  |  |  |  |
|-----------------------------------|-----------|------|--|--|--|--|
| 29                                | VP        |      |  |  |  |  |
|                                   | IN OUT    |      |  |  |  |  |
| $K_{_{e}}$                        | 0,1       | 0,3  |  |  |  |  |
| $K_{\scriptscriptstyle \Delta e}$ | 20        | 25   |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,001     | 0,05 |  |  |  |  |
| 30                                | VF        | )    |  |  |  |  |
|                                   | IN        | OUT  |  |  |  |  |
| $K_{_{e}}$                        | 0,5       | 0,35 |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                 | 20        | 25   |  |  |  |  |
| K <sub>uPI</sub>                  | 0,001 0,1 |      |  |  |  |  |
| 31                                | VF        | )    |  |  |  |  |
|                                   | IN        | OUT  |  |  |  |  |
| $K_{_{e}}$                        | 0,5       | 0,35 |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                 | 20        | 25   |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,001     | 0,03 |  |  |  |  |
| 32                                | VF        | )    |  |  |  |  |
|                                   | IN        | OUT  |  |  |  |  |
| $K_{_{e}}$                        | 0,1       | 0,1  |  |  |  |  |
| $K_{_{\Delta e}}$                 | 20        | 25   |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,005     | 0,02 |  |  |  |  |
| 33                                | VP        |      |  |  |  |  |
|                                   | IN        | OUT  |  |  |  |  |
| $K_{_{e}}$                        | 0,1       | 0,1  |  |  |  |  |
| $\overline{K_{_{\Delta e}}}$      | 20        | 25   |  |  |  |  |
| $K_{_{uPI}}$                      | 0,003     | 0,04 |  |  |  |  |

# Příloha B Fuzzy Pattern klasifikace

# B.1 Přehled parametrů fuzzy regulátorů pro prvních 50 experimentů

| 1 | VP   |       |         |           | 8  | VP    |       |         |            | 15 | VP       |       |         |      |
|---|------|-------|---------|-----------|----|-------|-------|---------|------------|----|----------|-------|---------|------|
|   | IN   |       | OUT     |           |    | IN    |       | OUT     |            |    | IN       |       | OUT     |      |
|   | de   | 20    | de      | 25        |    | de    | 30    | de      | 25         |    | de       | 20    | de      | 50   |
|   | IN e | 0,1   | OUT e   | 0,1       |    | IN e  | 0,2   | OUT e   | 0,1        |    | IN e     | 0,2   | OUT e   | 0,15 |
|   | IN u | 0,003 | OUT u   | 0,04      | ļ  | IN u  | 0,002 | OUT u   | 0,04       |    | IN u     | 0,002 | OUT u   | 0,04 |
|   |      |       |         |           |    |       |       |         |            |    |          |       |         |      |
| 2 | VP   |       |         |           | 9  | VP    |       |         |            | 16 | VP       |       |         |      |
|   | IN   |       | OUT     |           |    | IN    |       | OUT     |            |    | IN       |       | OUT     |      |
|   | de   | 20    | de      | 25        |    | de    | 20    | de      | 25         |    | de       | 20    | de      | 25   |
|   | IN e | 0,1   | OUT e   | 0,1       |    | IN e  | 0,2   | OUT e   | 0,2        |    | IN e     | 0,2   | OUT e   | 0,15 |
|   | IN u | 0,003 | OUT u   | 0,04      | ļ  | IN u  | 0,002 | OUT u   | 0,04       |    | IN u     | 0,002 | OUT u   | 0,04 |
| 1 |      |       |         |           | 1  |       |       |         |            | 1  |          |       |         |      |
| 3 | VP   |       |         |           | 10 | VP    |       |         |            | 17 | VP       |       |         |      |
|   | IN   |       | OUT     |           |    | IN    |       | OUT     |            |    | IN       |       | OUT     |      |
|   | de   | 20    | de      | 25        |    | de    | 20    | de      | 25         |    | de       | 20    | de      | 20   |
|   | IN e | 0,1   | OUT e   | 0,1       |    | IN e  | 0,2   | OUT e   | 0,2        |    | IN e     | 0,2   | OUT e   | 0,15 |
|   | IN u | 0,03  | OUT u   | 0,04      | ļ  | IN u  | 0,002 | OUT u   | 0,03       |    | IN u     | 0,002 | OUT u   | 0,04 |
| I |      |       |         |           | ı  | r     |       |         |            | 1  |          |       |         |      |
| 4 | VP   |       |         |           | 11 | VP    |       |         |            | 18 | VP       |       |         |      |
|   | IN   |       | OUT     |           |    | IN    |       | OUT     |            |    | IN       |       | OUT     |      |
|   | de   | 20    | de      | 25        |    | de    | 20    | de      | 30         |    | de       | 40    | de      | 25   |
|   | IN e | 0,1   | OUT e   | 0,1       |    | IN e  | 0,2   | OUT e   | 0,2        |    | IN e     | 0,2   | OUT e   | 0,15 |
|   | IN u | 0,003 | OUT u   | 0,04      | ļ  | IN u  | 0,002 | OUT u   | 0,04       |    | IN u     | 0,002 | OUT u   | 0,04 |
| 1 |      |       |         |           | ı  | r     |       |         |            |    |          |       |         |      |
| 5 | VP   |       | <u></u> |           | 12 | VP    |       | <u></u> |            | 19 | VP       |       | <u></u> |      |
|   | IN   | 20    |         | 25        |    | IN    | 20    |         | 25         |    | IN       | 40    |         | 25   |
|   | ae   | 20    | ae      | 25        |    | ae    | 20    | ae      | 25         |    | ae       | 40    | ae      | 25   |
|   | IN e | 0,2   | OUTe    | 0,1       |    | IN e  | 0,2   | OUTe    | 0,15       |    | IN e     | 0,2   | OUTe    | 0,15 |
|   | IN U | 0,002 | OUTu    | 0,04      | ļ  | IN U  | 0,002 | OUT u   | 0,04       |    | IN U     | 0,002 | OUT u   | 0,04 |
| ~ |      |       |         |           | 40 |       |       |         |            | 20 | 10       |       |         |      |
| 6 |      |       |         |           | 13 |       |       |         |            | 20 |          |       |         |      |
|   | do   | 20    | de      | 25        |    | do    | 20    | de      | 25         |    | nn<br>do | 1     | do      | 5    |
|   |      | 20    |         | 2J<br>0 1 |    |       | 20    |         | 2J<br>0.15 |    |          |       |         |      |
|   |      | 0,5   |         | 0,1       |    |       | 0,2   |         | 0,15       |    |          | 0,1   |         | 0,05 |
|   | in u | 0,001 | 0010    | 0,04      | ļ  | in u  | 0,002 | 001 u   | 0,05       |    | in u     | 0,005 | 001 u   | 0,1  |
| 7 |      |       |         |           | 11 |       |       |         |            | 21 |          |       |         |      |
| / |      |       |         |           | 14 |       |       |         |            | 21 |          |       |         |      |
|   | de   | 5     | de      | 25        |    | de    | 20    | de      | 25         |    | de       | 20    | de      | 25   |
|   | IN P | 03    |         | 01        |    |       | 0.2   |         | 0 14       |    | INP      | 01    |         | 0.05 |
|   | INII | 0.001 |         | 0.04      |    | INI   | 0 002 |         | 0.04       |    | INI      | 0.005 |         | 0.1  |
|   |      | 0,001 | 551 u   | 0,04      | J  | iii u | 0,002 | 5510    | 0,07       |    | u        | 0,000 | 501 U   | 0,1  |

| 22 |           |       |           |      | 20 |            |        |           |       | 26  |           |        |           |       |
|----|-----------|-------|-----------|------|----|------------|--------|-----------|-------|-----|-----------|--------|-----------|-------|
| 22 |           |       |           |      | 29 |            |        |           |       | 30  |           |        |           |       |
|    | lin<br>do | 20    | 001<br>do | 1    |    | nn<br>do   | FO     | 001<br>do | 10    |     | lin<br>do | 25     | 001<br>do | 10    |
|    | ue        | 20    |           |      |    | ue<br>IN o | 0.1    |           | 0.11  |     |           | 25     |           | 0.11  |
|    | in e      | 0,1   | our       | 0,05 |    | in e       | 0,1    | oute      | 0,11  |     | in e      | 0,5    | our       | 0,11  |
|    | IN U      | 0,005 | OUTU      | 0,1  |    | IN U       | 0,005  | OUT u     | 0,1   | J   | IN U      | 0,0005 | OUT u     | 0,1   |
| ĺ  |           |       |           |      | l  |            |        |           |       | 1   |           |        |           |       |
| 23 | VP        |       |           |      | 30 | VP         |        |           |       | 37  | VP        |        |           |       |
|    | IN        |       | OUT       |      |    | IN         |        | OUT       |       |     | IN        |        | OUT       |       |
|    | de        | 20    | de        | 5    |    | de         | 50     | de        | 10    |     | de        | 75     | de        | 10    |
|    | IN e      | 0,1   | OUT e     | 0,05 |    | IN e       | 0,1    | OUT e     | 0,11  |     | IN e      | 0,5    | OUT e     | 0,11  |
|    | IN u      | 0,005 | OUT u     | 0,1  |    | IN u       | 0,002  | OUT u     | 0,1   | ļ   | IN u      | 0,0005 | OUT u     | 0,1   |
|    |           |       |           |      |    |            |        |           |       | _   |           |        |           |       |
| 24 | VP        |       |           |      | 31 | VP         |        |           |       | 38  | VP        |        |           |       |
|    | IN        |       | OUT       |      |    | IN         |        | OUT       |       | 1   | IN        |        | OUT       |       |
|    | de        | 20    | de        | 10   |    | de         | 50     | de        | 10    |     | de        | 100    | de        | 10    |
|    | IN e      | 0,1   | OUT e     | 0,05 |    | IN e       | 0,15   | OUT e     | 0,11  |     | IN e      | 0,5    | OUT e     | 0,11  |
|    | IN u      | 0,005 | OUT u     | 0,1  |    | IN u       | 0,002  | OUT u     | 0,1   |     | IN u      | 0,0005 | OUT u     | 0,1   |
|    |           |       |           | ,    |    | <u></u>    |        |           | ,     | J   |           |        |           |       |
| 25 | VP        |       |           |      | 32 | VP         |        |           |       | 39  | VP        |        |           |       |
| 20 | IN        |       | OUT       |      |    | IN         |        | OUT       |       |     | IN        |        | OUT       |       |
|    | de        | 20    | de        | 10   |    | de         | 50     | de        | 10    |     | de        | 100    | de        | 10    |
|    | INe       | 0.1   | OUTe      | 0.05 |    | INe        | 0.2    | OUTe      | 0.11  |     | INe       | 0.5    | OUTe      | 0.11  |
|    | INII      | 0.005 |           | 0.2  |    | INI        | 0.002  |           | 0.1   |     | INII      | 0.0005 |           | 0.075 |
|    | intu      | 0,000 | 0014      | 0,2  |    | mu         | 0,002  | 0014      | 0,1   | J   | int d     | 0,0000 | 0010      | 0,075 |
| 26 | VP        |       |           |      | 22 | VP         |        |           |       | 110 | VP        |        |           |       |
| 20 | IN        |       | OUT       |      | 55 | IN         |        | OUT       |       |     | IN        |        | OUT       |       |
|    | de        | 50    | de        | 10   |    | de         | 50     | de        | 10    |     | de        | 100    | de        | 10    |
|    | IN e      | 01    |           | 0.05 |    | INP        | 0.15   |           | 0 11  |     | INP       | 0.75   |           | 0 11  |
|    | INI       | 0,1   |           | 0,05 |    |            | 0,15   |           | 0,11  |     |           | 0,75   |           | 0,11  |
|    | in u      | 0,005 | 0010      | 0,1  |    | in u       | 0,0002 | 001 u     | 0,1   | J   | in u      | 0,0005 | 0010      | 0,075 |
| 77 |           |       |           |      | 24 |            |        |           |       | 41  |           |        |           |       |
| 27 |           |       |           |      | 54 |            |        |           |       | 41  |           |        |           |       |
|    | do        | 50    | do        | 10   |    | do         | 50     | de        | 10    |     | do        | 100    | do        | 10    |
|    |           | 0.1   |           | 0.15 |    |            | 0.2    |           | 0 1 1 |     |           | 0.75   |           | 0.11  |
|    | IN E      | 0,1   |           | 0,15 |    | IN E       | 0,5    | OUTe      | 0,11  |     | IN E      | 0,75   |           | 0,11  |
|    | in u      | 0,005 | 001 u     | 0,1  |    | in u       | 0,0005 | 001 u     | 0,1   | J   | in u      | 0,0009 | 001 u     | 0,075 |
|    |           |       |           |      |    |            |        |           |       | 1   |           |        |           |       |
| 28 | VP        |       |           |      | 35 | VP         |        |           |       | 42  | VP        |        |           |       |
|    | IN        |       | OUT       |      |    | IN         |        | OUT       |       |     | IN        |        | OUT       |       |
|    | de        | 50    | de        | 10   |    | de         | 50     | de        | 10    |     | de        | 100    | de        | 10    |
|    | IN e      | 0,1   | OUT e     | 0,13 |    | IN e       | 0,5    | OUT e     | 0,11  |     | IN e      | 0,9    | OUT e     | 0,11  |
|    | IN u      | 0,005 | OUT u     | 0,1  |    | IN u       | 0,0005 | OUT u     | 0,1   | J   | IN u      | 0,0005 | OUT u     | 0,075 |

| 43 | VP   |         |       |       |
|----|------|---------|-------|-------|
|    | IN   |         | OUT   |       |
|    | de   | 100     | de    | 10    |
|    | IN e | 0,75    | OUT e | 0,18  |
|    | IN u | 0,0005  | OUT u | 0,075 |
|    |      |         |       |       |
| 44 | VP   |         |       |       |
|    | IN   |         | OUT   |       |
|    | de   | 100     | de    | 100   |
|    | IN e | 0,75    | OUT e | 0,11  |
|    | IN u | 0,0005  | OUT u | 0,075 |
|    |      |         |       |       |
| 45 | VP   |         |       |       |
|    | IN   |         | OUT   |       |
|    | de   | 100     | de    | 10    |
|    | IN e | 0,75    | OUT e | 0,11  |
|    | IN u | 0,005   | OUT u | 0,075 |
|    |      |         |       |       |
| 46 | VP   |         |       |       |
|    | IN   |         | OUT   |       |
|    | de   | 100     | de    | 10    |
|    | IN e | 0,01    | OUT e | 0,11  |
|    | IN u | 0,0005  | OUT u | 0,075 |
|    |      |         |       |       |
| 47 | VP   |         |       |       |
|    | IN   |         | OUT   |       |
|    | de   | 100     | de    | 10    |
|    | IN e | 0,01    | OUT e | 0,11  |
|    | IN u | 0,005   | OUT u | 0,075 |
|    |      |         |       |       |
| 48 | VP   |         |       |       |
|    | IN   |         | OUT   |       |
|    | de   | 100     | de    | 10    |
|    | IN e | 0,6     | OUT e | 0,11  |
|    | IN u | 0,005   | OUT u | 0,075 |
|    |      |         |       |       |
| 49 | VP   |         |       |       |
|    | IN   |         | OUT   |       |
|    | de   | 100     | de    | 10    |
|    | IN e | 0,75    | OUT e | 0,11  |
|    | IN u | 0,00005 | OUT u | 0,075 |

| 50 | VP   |         |       |       |
|----|------|---------|-------|-------|
|    | IN   |         | OUT   |       |
|    | de   | 100     | de    | 10    |
|    | IN e | 1       | OUT e | 0,5   |
|    | IN u | 0,00005 | OUT u | 0,075 |

## B.2 Grafické zobrazení výsledků pro 192 experimentů



Obr. B. 1: Závislost OUT u a IN u pro IN de = 50 a IN  $e = \langle 0, 15; 1, 05 \rangle$ 



Obr. B. 2: Závislost OUT u a IN u pro IN de = 75 a  $IN e = \langle 0, 15; 1, 05 \rangle$


Obr. B. 3: Závislost OUT u a IN u pro IN de = 100 a IN  $e = \langle 0, 15; 1, 05 \rangle$ 



Obr. B. 4: Závislost OUT u a IN u pro IN de = 125 a IN  $e = \langle 0, 15; 1, 05 \rangle$