

**Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky  
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave**

**Ing. Michal Blaho**

**FUZZY SYSTÉMY TYPU-2  
V SIEŤOVÝCH RIADIACICH SYSTÉMOCH**

**Autoreferát dizertačnej práce**

na získanie vedecko-akademickej hodnosti  
**philosophiae doctor**

v odbore doktorandského štúdia:  
**5.2.14 Automatizácia a riadenie**

**Bratislava, 2012**

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

*Predkladateľ:* **Ing. Michal Blaho**

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

*Školiteľ:* **prof. Ing. Ján Murgaš, PhD.**

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

*Oponenti:* prof. Ing. Mikuláš Alexík, CSc.  
Fakulta riadenia a informatiky, ŽU v Žiline  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

doc. Ing. Anton Kachaňák, CSc.  
Strojnícka fakulta, STU v Bratislave  
Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná .....

pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa ..... číslo odboru: 5.2.14, odbor doktorandského štúdia: Automatizácia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

*Predseda spoločnej odborovej komisie:*

.....

## **Názov: Fuzzy systémy typu-2 v sieťových riadiacich systémoch**

### **Abstrakt**

Moderné riadiace systémy sa snažia nahradiť priame prepojenie prvkov využitím komunikačných sietí. Komunikačné siete prinášajú nové problémy ako dopravné oneskorenie a výpadky dátových rámcov. V rámci tejto práce sme sa rozhodli preveriť možnosť modelovať problémy sieťových riadiacich systémov pomocou fuzzy logiky typu-1 a typu-2. V dizertačnej práci sme analyzovali vplyv rôznych typov fuzzy systémov na kvalitu riadenia. Zapojením fuzzy systémov do známych riadiacich štruktúr sme preukázali na ich výhody. Modifikáciou riadenia v kľzavom režime sme navrhli riadiaci systém, ktorý je schopný vysporiadať sa s premenlivým dopravným oneskorením v sieťovom riadiacom systéme a nepotrebuje poznať presný model systému. Všetky navrhnuté riešenia boli overené na simulačnom modeli.

## **Title: Type-2 fuzzy systems in networked control systems**

### **Abstract**

Modern control systems are trying to replace point-to-point with the communication networks. Communication networks introduce new challenges such as network delays and packet dropouts. In this thesis, we decided to examine the possibility of modeling problems of networked control systems using type-1 and type-2 fuzzy logic. In the dissertation thesis, we analyzed the effect of different types of fuzzy systems on the quality of control. We are showing advantages of fuzzy systems by implementing them to the known control structures. We are proposing a control system that is able to deal with variable time-delay in the networked control system and does not need to know the exact model of the system with modification of the sliding mode control. All proposed solutions have been validated on the simulation model.

## Obsah

1. Úvod .....	6
2. Fuzzy systémy typu-1 .....	6
2.1. Funkcie príslušnosti typu-1.....	6
2.2. Fuzzy systém typu-1 so singleton fuzzifikáciou .....	7
2.3. Fuzzy systém typu-1 s ne-singleton fuzzifikáciou typu-1 .....	8
3. Fuzzy systémy typu-2 .....	9
3.1. Funkcie príslušnosti typu-2.....	9
3.2. Fuzzy systém typu-2 so singleton fuzzifikáciou .....	10
3.3. Fuzzy systém typu-2 s ne-singleton fuzzifikáciou typu-1 .....	12
3.4. Fuzzy systém typu-2 s ne-singleton fuzzifikáciou typu-2 .....	13
4. Sieťové riadiace systémy .....	14
4.1. Negatívne vlastnosti sieťových riadiacich systémov .....	14
4.2. Priemyselné zbernice a siete .....	15
4.3. Simulácia SRS .....	15
5. Fuzzy systémy v SRS .....	15
5.1. Fuzzy modulácia .....	15
5.2. Self-tuning Fuzzy Controller pre sieťové riadenie .....	16
5.3. Smithov prediktor .....	16
5.4. Kľzavý režim v SRS .....	17
5.5. Takagi-Sugeno štruktúry .....	20
6. Formulácia problému a ciele dizertačnej práce.....	20
7. Analýza vplyvu fuzzy systémov typu-2 na SRS .....	21
7.1. Riadený systém .....	21
7.2. Porovnanie fuzzy systémov .....	21
7.3. Simulácia v modely reálnej siete .....	22
7.3.1. Perióda vzorkovania .....	23
7.3.2. Počet uzlov siete.....	24
7.3.3. Výpadok dátových rámcov.....	24
7.4. Využitie Smithovho prediktora .....	25
7.4.1. Perióda vzorkovania .....	25

7.4.2. Počet uzlov siete.....	26
7.4.3. Výpadok dátových rámcov.....	26
<b>8. Modifikácie kľzavého režimu.....</b>	<b>26</b>
8.1. Modifikácia kľzavého režimu z kapitoly 5.4 s premenlivým oneskorením.....	27
8.2. Modifikácia kľzavého režimu pre systém s neznámymi parametrami a konštantným oneskorením.....	28
8.3. Modifikácia kľzavého režimu pre systém s neznámymi parametrami a premenlivým oneskorením.....	31
8.4. Simulačné overenie riadiacich systémov.....	33
8.4.1. Simulácia riadiaceho systému z kapitoly č. 5.4.....	34
8.4.2. Simulácia riadiaceho systému z kapitoly č. 8.1.....	35
8.4.3. Simulácia riadiaceho systému z kapitoly č. 8.2.....	35
8.4.4. Simulácia riadiaceho systému z kapitoly č. 8.3.....	36
<b>9. Záver.....</b>	<b>37</b>
<b>Použitá literatúra.....</b>	<b>38</b>

# 1. Úvod

Od prvého návrhu fuzzy logiky uplynulo už viac ako 45 rokov. Napriek tomu, že fuzzy logika predstavuje isté synonymum pre prácu s neurčitostami, nedokáže ich vplyv modelovať ideálne. Koncept lepšieho modelovania neurčitosti bol oprášený koncom minulého storočia a vznikla tak nová oblasť fuzzy systémov (typu-2), ktorá popisuje neurčitosti fuzzy množín a ich úlohu vo fuzzy systémoch. Teória nových fuzzy systémov je doposiaľ predmetom skúmania.

Napriek veľkému využitiu zberníc sa príchodom technológie Ethernetu otvorila možnosť využiť káblové a bezdrôtové počítačové siete v riadení. Aby boli splnené požiadavky na kvalitu prenosu dát začali sa vyvíjať nové komunikačné protokoly. Napriek všetkým výhodám káblových a bezdrôtových sietí vznikli problémy, ktoré je potrebné pri návrhu riadiacich systémov uvažovať. Na stabilitu a kvalitu riadenia najviac vplyvajú dopravné oneskorenia a výpadky dátových rámcov.

Využitie fuzzy systémov v oblasti sieťového riadenia prináša nový pohľad na modelovanie a riadenie. Negatívne vplyvy komunikačných sietí môžeme vnímať ako neurčitosti v systéme. Potlačiť ich môžeme vhodným typom fuzzifikácie alebo sadou pravidiel. Práve v tomto smere nam môžu poskytnúť výhodu fuzzy systémy typu-2. Podľa našej mienky nebolo venované dostatočné množstvo záujmu využitiu fuzzy logiky typu-2 na potlačenie nepriaznivých javov v sieťových riadiacich systémoch. Predkladaná práca má preukázať možné prínosy využitia fuzzy logiky typu-2 na riadenie sieťových systémov a navrhnúť stabilné adaptívne riadenie využívajúce fuzzy logiku typu-2.

Práca je rozdelená nasledovne. Kapitola č.2 prináša popis fuzzy systémov typu-1 a ich pohľad na modelovanie neurčitosti na vstupe do systému. Rozšírenie fuzzy systémov typu-1 na fuzzy systémy typu-2 popisuje kapitola č.3 a ukazuje pokročilejšie modelovanie neurčitosti v pravidlách ako aj na vstupe pomocou nových fuzzy množín. Kapitola č. 4 popisuje vlastnosti sieťových riadiacich systémov, najvyužívanejšie priemyselné siete a možnosť ich modelovania. Využitie fuzzy systémov v riadiacich štruktúrach sieťových riadiacich systémov popisuje kapitola č. 5. Kapitola č. 6 prináša formuláciu problému a uvádza ciele dizertačnej práce. Analýze vplyvu fuzzy systémov typu-2 na sieťové riadiacie systémy sa venuje kapitola č. 7 a v kapitole č. 8 sú navrhnuté modifikácie kľavého režimu využívajúceho fuzzy adaptívne riadenie. Záver a zhrnutie práce prináša kapitola č. 9.

## 2. Fuzzy systémy typu-1

V roku 1965 Zadeh predstavil fuzzy logiku (Zadeh 1965). Uviedol množiny, v ktorých sú objekty popísané stupňom príslušnosti. Zadehové myšlienky boli neskôr rozšírené o modely fuzzy systémov. Tieto modely dopomohli k využitiu fuzzy logiky v praxi a fuzzy logika bola nasadená do systémov, kde konvenčné riadiace prístupy neboli použiteľné. Významnou vlastnosťou fuzzy logiky je jej využitie pri aproximácii funkcií. Táto vlastnosť sa využíva pri návrhu stabilných systémov riadenia s využitím fuzzy logiky. V tejto kapitole si opíšeme základné poznatky fuzzy systémov typu-1, pričom je z väčšej časti prevzatá z literatúry (Mendel 2001).

### 2.1. Funkcie príslušnosti typu-1

Funkcie príslušnosti charakterizujú fuzzy množiny a dosahujú hodnoty v intervale 0 až 1. Funkcie charakterizujú stupeň príslušnosti prvku z množiny  $X$  vo fuzzy množine.

**Definícia 2.1** Fuzzy množina typu-1, označená  $A$ , je charakterizovaná funkciou príslušnosti typu-1  $\mu_A(x)$ , kde  $x \in X$

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | \forall x \in X\} \quad (2.1)$$

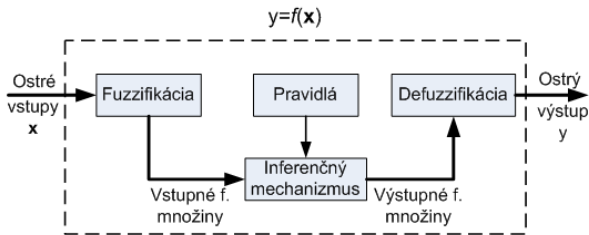
a platí, že  $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ . Fuzzy množinu  $A$  môžeme zapísať aj ako

$$A = \int_{x \in X} \mu_A(x) / x \quad (2.2)$$

kde symbol  $\int$  označuje zjednotenie všetkých dosiahnuteľných  $x$ .

## 2.2. Fuzzy systém typu-1 so singleton fuzzifikáciou

Tento fuzzy systém má najväčšie zastúpenie pri návrhu fuzzy regulátorov prípadne iného využitia fuzzy logiky v praxi. Z tohto základného systému sa vychádza pri návrhu ďalších pokročilejších systémov fuzzy logiky. Štruktúra fuzzy systému opísaného v tejto časti sa dá vyjadriť obrázkom (Obr. 2.1).



Obr. 2.1 Fuzzy systém typu-1

Fuzzifikácia zobrazuje ostrý vstup na fuzzy množinu. Najčastejšie používaná fuzzifikácia je singleton fuzzifikácia, ktorá zobrazuje vstup  $x_i$  na fuzzy singleton.

**Definícia 2.2** Singleton fuzzifikácia prideluje vstupu  $x_i$  fuzzy singleton. Hodnota singletonu je  $\mu_{X_i}(x'_i) = 1$  pre  $x_i = x'_i$  a  $\mu_{X_i}(x_i) = 0$  pre  $x_i \neq x'_i$

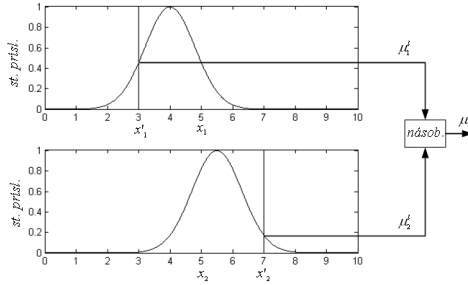
Pravidlo predstavuje fuzzy reláciu medzi priestorom vstupu a výstupu systému fuzzy logiky. Inferenčný mechanizmus kombinuje fuzzy pravidlá z našej bázy pravidiel. Vzťah pre výstupnú fuzzy množinu sa dá vyjadriť ako

$$\begin{aligned} \mu_{B^i}(y) = \mu_{G^i}(y) * \left\{ \left[ \sup_{x_1 \in X_1} \mu_{X_1}(x_1) * \mu_{F_1^i}(x_1) \right] * \right. \\ \left. \dots * \left[ \sup_{x_p \in X_p} \mu_{X_p}(x_p) * \mu_{F_p^i}(x_p) \right] \right\}, y \in Y \end{aligned} \quad (2.3)$$

Pre singleton fuzzifikáciu je suprémum iba jeden bod, preto môžeme vzťah pre výstupnú fuzzy množinu pre singleton fuzzifikáciu ako

$$\mu_{B^i}(y) = \mu_{G^i}(y) * \left[ \mu_{F_1^i}(x'_1) * \dots * \mu_{F_p^i}(x'_p) \right], y \in Y \quad (2.4)$$

vzťah v zátvorke reprezentuje tzv. spúšťačnú hladinu. Na nasledujúcom obrázku je príklad operácií vstupu a predpokladu pre tento prípad.



Obr. 2.2 Určenie spúšťacích hladín

Na získanie ostrého výstupu je potrebné vykonať operáciu defuzzifikácie. Dve najviac využívané metódy defuzzifikácie sú metóda výšok a stred množín.

### 2.3. Fuzzy systém typu-1 s ne-singleton fuzzifikáciou typu-1

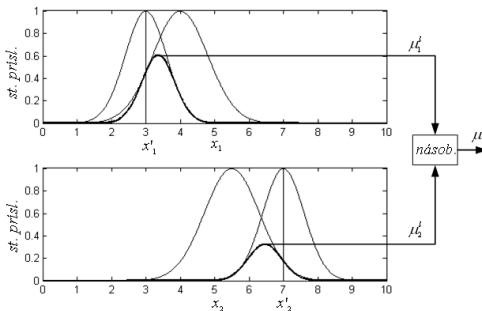
V predchádzajúcej časti sme modelovali vstupy ako fuzzy singletony. Teraz budeme vstupy modelovať ako fuzzy čísla typu-1.

**Definícia 2.3** Ne-singleton fuzzifikácia typu-1 prideluje vstupu  $x_i$  fuzzy funkciu príslušnosti typu-1. Hodnota funkcie príslušnosti je  $\mu_{x_i}(x_i') = 1$  pre  $x_i = x_i'$  a klesá k 0 ako sa  $x_i$  vzdaluje od  $x_i'$ .

Z toho vyplýva, že nameraná hodnota je správna vzhľadom na susedné hodnoty. Supremum zo vzťahu (2.3) sa nedá zjednodušiť ako v predchádzajúcej časti kvôli fuzzifikácii. Mouzouris a Mendel preto upravili inferenčný mechanizmus (Mouzouris a Mendel 1997)

$$\mu_{B^t}(y) = \mu_{G^t}(y) \star \left[ T_{k=1}^p \mu_{Q_k^l}(x_{k,max}^l) \right], y \in Y \quad (2.5)$$

pričom symbol  $T$  označuje t-normu,  $x_{k,max}^l$  označuje bod v ktorom dosiahneme supremum a  $l = 1, \dots, M$ . Analytický výpočet  $x_{k,max}^l$  sa pre väčšinu funkcií príslušnosti robí numericky. Na nasledujúcom obrázku je príklad operácií vstupu a predpokladu.



Obr. 2.3 Určenie spúšťacích hladín



Spomenuté fuzzy systémy typu-1 je možné popísať matematickým vzťahom. Fuzzy bázové funkcie vyjadríme nasledovne

$$\phi_l(\mathbf{x}) = \frac{\prod_{i=1}^p \mu_{F_l^i}(x_i)}{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^p \mu_{F_l^i}(x_i)} \quad (2.6)$$

a následne môžeme vyjadriť fuzzy systém ako rozšírenie fuzzy bázových funkcií

$$y(\mathbf{x}) = f_s(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^M \bar{y}^l \phi_l(\mathbf{x}) \quad (2.7)$$

Výhodnou vlastnosťou fuzzy systémov typu-1 je ich schopnosť aproximovať ľubovoľnú nelineárnu funkciu (Wang 1994, Mendel 2001).

**Veta 2.1** Pre ľubovoľnú reálnu spojitú funkciu na kompaktnej množine  $U \subset \mathbb{R}^n$  a ľubovoľné  $\epsilon > 0$  existuje fuzzy systém  $f$  taký, že

$$\sup_{\mathbf{x} \in U} |f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x})| < \epsilon \quad (2.8)$$

Presnosť aproximácie závisí od počtu parametrov. Na druhej strane s počtom parametrov narastá aj komplexnosť fuzzy systému. Veta o univerzálnom aproximátore nehovorí o tom, ako samostatný systém navrhnuť.

### 3. Fuzzy systémy typu-2

Vedci si všimli nedostatky fuzzy systémov. Už pri tvorbe takýchto systémov sa stretávame s neurčitostami, ktoré boli zhrnuté do štyroch základných bodov:

- zmysel slov použitých vo fuzzy pravidlách je pre rôznych ľudí iný
- výstupné množiny pravidiel môžu byť opísané histogramom, rôzni experti môžu využívať iné množiny
- merania vstupov sú často zašumené, a preto neurčité
- dáta využité na tréning sú podobne zašumené

Fuzzy systémy typu-1 nedokážu priamo pracovať s neurčitostami. Tento fakt si všimol aj Zadeh a načrtnol koncept fuzzy množín typu-2 (Zadeh 1975). Pretože fuzzy systémy typu-1 poskytovali dostatočné výsledky a jednoduchosť, rozvoj fuzzy množín typu-2 stál v úzadí. Koncom minulého storočia vedci začali skúmať fuzzy množiny typu-2 a priniesli teoretický základ pre rozvoj fuzzy systémov typu-2. Podobné ako predchádzajúca časť, aj táto časť prevzala teoretické znalosti z literatúry (Mendel 2001).

#### 3.1. Funkcie príslušnosti typu-2

V tejto časti si zadefinujeme funkcie príslušnosti typu-2, ktoré nám umožnia lepšie pracovať s neurčitostami.

**Definícia 3.1** Fuzzy množina typu-2, označená  $\tilde{A}$ , je charakterizovaná funkciou príslušnosti typu-2  $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ , kde  $x \in X$  a  $u \in J_x \subseteq [0, 1]$

$$\tilde{A} = \{((x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u)) \mid \forall x \in X, u \in J_x \subseteq [0, 1] \mid u \in J_x \subseteq [0, 1]\} \quad (3.1)$$

kde  $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$ .  $\tilde{A}$  môžeme vyjadriť aj ako

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) \quad J_x \subseteq [0, 1] \quad (3.2)$$

kde  $\int$  označuje zjednotenie všetkých dostupných  $x$  a  $u$ .

Fuzzy množiny typu-2 môžeme vyjadriť pomocou 2D rovin. V každom bode  $x = x'$  2D rovina, ktorej osi sú  $u$  a  $\mu_{\tilde{A}}(x', u)$  sa nazýva vertikálny rez  $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ . Sekundárna funkcia príslušnosti je vertikálny rez  $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ . Sekundárna funkcia príslušnosti je fuzzy množina typu-1, ktorú označujeme ako sekundárna množina. Doména všetkých sekundárnych funkcií príslušnosti sa nazýva primárna príslušnosť  $x$ . Amplitúda sekundárnej funkcie príslušnosti sa nazýva sekundárny stupeň príslušnosti. Neurčitosť v primárnej príslušnosti fuzzy množiny typu-2  $\tilde{A}$  predstavuje ohraničenú oblasť, ktorú nazývame stopa neurčitosti (FOU). Je to zjednotenie všetkých primárnych príslušností. Primárna funkcia príslušnosti je jedna z funkcií príslušnosti typu-1  $\mu_A(x|p_1, p_2, \dots, p_v)$  kde  $p_1, p_2, \dots, p_v$  sú parametre, ktoré sa môžu meniť z rozsahu hodnôt. Rodina všetkých primárnych funkcií príslušnosti tvorí FOU. Horná a dolná funkcia príslušnosti sú dve funkcie príslušnosti typu-1 ktoré ohraničujú FOU fuzzy množiny typu-2  $\tilde{A}$ . Horná funkcia príslušnosti je spojená s hornou hranicou  $FOU(\tilde{A})$  a označuje sa  $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ . Dolná funkcia príslušnosti je spojená s dolnou hranicou  $FOU(\tilde{A})$  a označuje sa  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ . Pretože doména sekundárnej funkcie príslušnosti bola obmedzená intervalom  $[0, 1]$  dolná a horná funkcia príslušnosti vždy existujú. V špeciálnych prípadoch sú sekundárne funkcie príslušnosti intervalove množiny

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \left[ \int_{u \in J_x} 1/u \right] / x = \int_{x \in X} \left[ \int_{u \in [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)]} 1/u \right] / x \quad (3.3)$$

Pre využitie T2 fuzzy množín musíme definovať základné operácie zjednotenia, prieniku a doplnku. Pre intervalové fuzzy množiny typu-2 môžeme zjednotenie vyjadriť ako

$$\mu_{\tilde{A}}(x) \sqcup \mu_{\tilde{B}}(x) = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} 1/u \vee w \quad x \in X \quad (3.4)$$

Pre intervalové fuzzy množiny typu-2 môžeme prienik vyjadriť ako

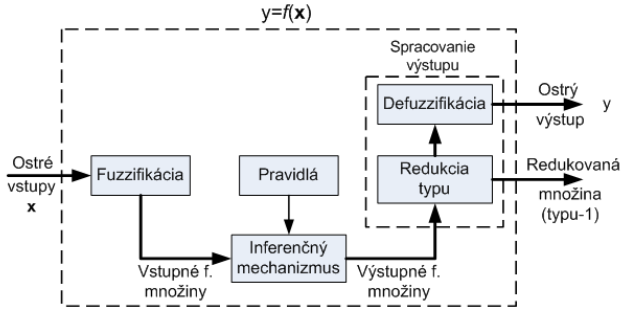
$$\mu_{\tilde{A}}(x) \sqcap \mu_{\tilde{B}}(x) = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} 1/u \wedge w \quad x \in X \quad (3.5)$$

Pre intervalové fuzzy množiny typu-2 môžeme doplnok vyjadriť ako

$$\neg \mu_{\tilde{A}}(x) = \int_{u \in J_x^u} 1/1 - u \quad x \in X \quad (3.6)$$

### 3.2. Fuzzy systém typu-2 so singleton fuzzifikáciou

Pomocou znalostí z predchádzajúcej časti môžeme zostrojiť fuzzy systémy typu-2. Výhodou nového fuzzy systému je uvažovanie neurčitostí v pravidlách a na vstupe. V tejto časti si opíšeme systém, ktorý uvažuje neurčitosť pravidiel. Všeobecne sa fuzzy systém typu-2 môže popísať pomocou obrázka (Obr. 3.1). Oproti fuzzy systému typu-1 obsahuje blok na spracovanie výstupu s redukciou typu.



Obr. 3.1 Fuzzy systém typu-2

Podobne ako fuzzy systémy typu-1 aj fuzzy systémy typu-2 obsahujú blok fuzzifikácie. V tomto prípade sa už ostrý vstup zobrazuje na fuzzy množinu typu-2.

**Definícia 3.2** Fuzzy singleton typu-2 ak priraduje hodnotu  $\mu_{\tilde{x}}(\mathbf{x}) = 1/1$  pre  $\mathbf{x} = \mathbf{x}'$  a hodnotu  $\mu_{\tilde{x}}(\mathbf{x}) = 1/0$  pre všetky  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$  kde  $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}'$

Inferenčný mechanizmus kombinuje pravidlá a zobrazuje vstupné fuzzy množiny typu-2 na výstupné fuzzy množiny typu-2

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left\{ \left[ \bigcup_{x_1 \in X_1} \mu_{\tilde{x}_1}(x_1) \cap \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \cap \dots \cap \left[ \bigcup_{x_p \in X_p} \mu_{\tilde{x}_p}(x_p) \cap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right] \right\} \quad y \in Y \quad (3.7)$$

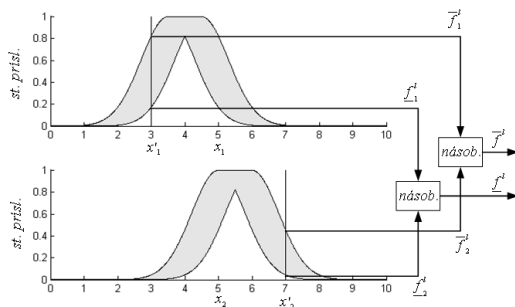
Vďaka typu fuzzifikácie, pri konkrétnom vstupe  $x_i'$  môžeme časť predchádzajúceho vzťahu v zátvorkách zjednodušiť na

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left[ \prod_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i^l}(x_i') \right] \quad y \in Y \quad (3.8)$$

Vzťah v zátvorkke predstavuje spúšťaciu množinu. Výpočet posledného vzťahu je pre všeobecné fuzzy množín typu-2 náročný, preto sa pri výpočte využívajú intervalové fuzzy množiny typu-2. Redukcia typu zabezpečuje prechod od fuzzy množín typu-2 na typ-1. Existuje niekoľko metód redukcii typu, ktoré vychádzajú z defuzzifikačných metód. Iteratívny algoritmus na ich vypočítanie nájde čitateľ v literatúre (Mendel 2001). Na výpočet ostrého výstupu potrebujeme vypočítať defuzzifikáciu redukovanej množiny. Pre intervalové množiny typu-2 je defuzzifikácia priemerom hraníc redukovanej intervalovej funkcie príslušnosti

$$y(x) = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (3.9)$$

Pretože sú všeobecné fuzzy systémy typu-2 výpočtovo zložité, využívajú sa jednoduchšie intervalové systémy. Na nasledujúcom obrázku je príklad operácii vstupu a predpokladu pre intervalový prípad.



Obr. 3.2 Určenie spúšťacích hladín

### 3.3. Fuzzy systém typu-2 s ne-singleton fuzzifikáciou typu-1

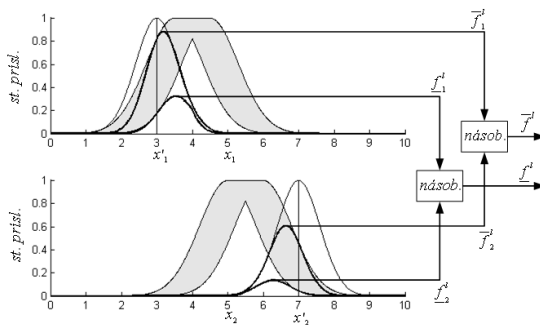
V predchádzajúcej časti sme si popísali časti fuzzy systému typu-2. Tento fuzzy systém typu-2 však nepočítal s neurčitostami vstupov, pretože sme využívali singleton fuzzifikáciu. Teraz budeme modelovať vstupy ako fuzzy množiny typu-1.

**Definícia 3.3** Ne-singleton fuzzifikácia typu-1 zobrazuje vstup  $x = x'$  na fuzzy číslo typu-1, teda priraduje vstupu funkciu príslušnosti typu-1.

Na ne-singleton fuzzifikáciu typu-1 môžeme využiť známe funkcie ako je trojuholníková alebo Gaussová funkcia príslušnosti. Vzhľadom na fuzzifikáciu môžeme zapísať inferenčný mechanizmus ako

$$\mu_{\tilde{B}^i}(y) = \mu_{\tilde{C}^i}(y) \cap \left\{ \left[ \sqcup_{x_1 \in X_1} \mu_{X_1}(x_1) \cap \mu_{\tilde{F}_1^i}(x_1) \right] \cap \dots \cap \left[ \sqcup_{x_p \in X_p} \mu_{X_p}(x_p) \cap \mu_{\tilde{F}_p^i}(x_p) \right] \right\}, \quad y \in Y \quad (3.10)$$

Tento fuzzy systém zahŕňa nielen neurčitosti v predpoklade, ale aj neurčitosti vstupu. Pre všeobecný výpočet je náročný, preto Liang a Mendel upravili vzťahy pre intervalové fuzzy množiny typu-2 (Liang a Mendel 2000). Na nasledujúcom obrázku je príklad operácií vstupu a predpokladu pre intervalový prípad.



Obr. 3.3 Určenie spúšťacích hladín

### 3.4. Fuzzy systém typu-2 s ne-singleton fuzzifikáciou typu-2

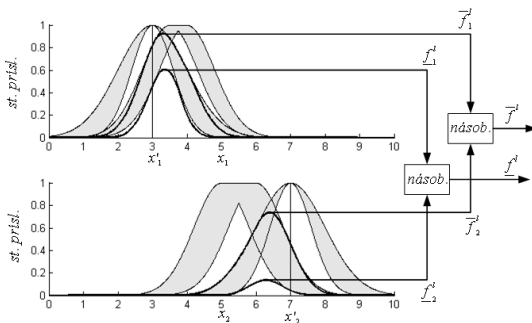
V predchádzajúcej časti sme si ukázali ako vplývajú vstupy modelované pomocou funkcií príslušnosti typu-1 na fuzzy systém typu-2. V tejto časti budeme vstupy modelovať ako funkcie príslušnosti typu-2.

**Definícia 3.4** Ne-singleton fuzzifikácia typu-2 zobrazuje vstup  $x = x'$  na fuzzy číslo typu-2, teda priraduje vstupu funkciu príslušnosti typu-2.

Najčastejšie využívané funkcie príslušnosti typu-2 sú Gaussové funkcie príslušnosti s neurčitou strednou hodnotou alebo s neurčitou štandardnou odchýlkou. Vzhľadom na fuzzifikáciu môžeme zapísať inferenčný mechanizmus ako

$$\mu_{\bar{B}^l}(y) = \mu_{\bar{C}^l}(y) \cap \left\{ \sqcup_{x_1 \in X_1} \mu_{\bar{X}_1}(x_1) \cap \mu_{\bar{F}_1^l}(x_1), \right. \\ \left. \dots \cap \left[ \sqcup_{x_p \in X_p} \mu_{\bar{X}_p}(x_p) \cap \mu_{\bar{F}_p^l}(x_p) \right] \right\}, \quad y \in Y \quad (3.11)$$

Tento fuzzy systém zahŕňa nielen neurčitosti v predpoklade, ale aj neurčitosti vstupu. Liang a Mendel upravili predošlé vzťahy pre intervalové fuzzy množiny typu-2 (Liang a Mendel 2000). Na nasledujúcom obrázku je príklad operácií vstupu a predpokladu pre intervalový prípad.



Obr. 3.4 Určenie spúšťacích hladín

Podobne ako v kapitole 2.4 by sme mohli vyjadriť fuzzy systém typu-2 pomocou základných funkcií. Pretože štruktúra fuzzy systému typu-2 je zložitejšia nemôžeme všeobecne zapísať fuzzy systém pomocou základných funkcií. Je to však možné pre intervalový prípad. Ľavú časť redukovanej fuzzy množiny môžeme zapísať ako

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{f}_i^l y_i}{\sum_{i=1}^M \bar{f}_i^l} = \frac{\sum_{i=1}^L \bar{f}^i y_i + \sum_{j=L+1}^M \bar{f}^j y_i}{\sum_{i=1}^L \bar{f}^i + \sum_{j=L+1}^M \bar{f}^j} = \sum_{i=1}^M y_i p_i(x) \quad (3.12)$$

kde  $p_i^j(x)$  je fuzzy základná funkcia prislúchajúca  $y_i$

$$p_i^j(x) = \frac{h_i^j}{\sum_{i=1}^L \bar{f}^i + \sum_{j=L+1}^M \bar{f}^j} \quad (3.13)$$

a

$$h_i^j = \begin{cases} \bar{f}^i & i = 1, \dots, L \\ f^i & i = L + 1, \dots, M \end{cases} \quad (3.14)$$

Výpočty básových funkcií je potrebné opäť robiť iteratívne. V kapitole venujúcej sa fuzzy systémom typu-1 sme poukázali na výhodnú vlastnosť fuzzy systémov, ktoré dokážu aproximovať ľubovoľnú nelineárnu funkciu s danou presnosťou. Hoci táto skutočnosť nebola dlho dokázaná pre fuzzy systém typu-2 väčšina výskumníkov využívala tento systém ako univerzálny aproximátor intuitívne. Ying napodobnil dôkaz vety pre fuzzy systémy typu-1 a odvodil vetu pre univerzálny aproximátor všeobecných intervalových fuzzy systémov typu-2 (Ying 2008)

**Veta 3.1** Všeobecný fuzzy systém typu-2  $F_n(\mathbf{x})$  dokáže aproximovať každú funkciu  $G(\mathbf{x})$ , ktorá je spojitá v  $C^r[-1,1]$  v ľubovoľnej presnosti.

$$\|F_n - G\| = \max_{\mathbf{x} \in C^r[-1,1]} |F_n(\mathbf{x}) - G(\mathbf{x})| < \varepsilon \quad (3.15)$$

## 4. Sieťové riadiace systémy

Princíp prenosu dát pomocou počítačových sietí sa zdal výhodný pre priemyselne využitie a vznikla tak nová oblasť riadenia – sieťové riadiace systémy (SRS). Vo sieťových riadiacich systémoch sú dynamické systémy riadené cez komunikačnú sieť.

### 4.1. Negatívne vlastnosti sieťových riadiacich systémov

Zapojenie komponentov regulačného obvodu do komunikačnej siete zťažuje analýzu a návrh celého systému. Pretože prostriedky siete sú limitované dochádza v sieti k vzniku dopravného oneskorenia pri výmene informácií. Pri neúspešnom prenose dát vznikajú výpadky dátových rámcov. Komunikačné médium zaručuje výmenu dát medzi časťami SRS a vnáša do celého systému ďalšie oneskorenia. Podľa miesta vzniku oneskorenia v SRS môžeme rozdeliť oneskorenia na:

- Komunikačné oneskorenie medzi senzorom a regulátorom  $\tau^{sc}$
- Oneskorenie výpočtu akčného zásahu  $\tau^c$
- Komunikačné oneskorenie medzi regulátorom a akčným členom  $\tau^{sa}$

Pre jednoduchosť návrhu riadiacich systémov sa oneskorenia v niektorých prípadoch zlučujú do jedného oneskorenia  $\tau$ . Ako pri návrhu klasických riadiacich systémov sa oneskorenie  $\tau^c$  môže aj v SRS zanedbať prípadne zlúčiť s jedným z komunikačných oneskorení.

V sieťových riadiacich systémoch dochádza občas k výpadku dátových rámcov z dôvodu kolízie pri prenose dátových rámcov prípadne výpadku uzla alebo komunikácie. Výpadky dátových rámcov sa prejavujú viac v bezdrôtových sieťach, pretože so vzdialenosťou slabne signál, sú citlivejšie na rušenie a zmenu topológie. Väčšina sieťových protokolov sa môže pri neúspešnom prenose dátových rámcov pokúsiť o opätovné poslanie správy. Tento mechanizmus je k dispozícii iba limitovaný čas a po tomto limite sa dátový rámec stráca.

## 4.2. Priemyselné zbernice a siete

S rozvojom sieťového riadenia sa začali objavovať nové koncepty protokolov a komunikačných médií špecializujúcich sa práve na túto oblasť. Priemyselné zbernice (CAN zbernica), ktoré boli v priemysle využívané už dlhé roky boli základom pre káblové priemyselné siete. Väčšina výrobcov káblových sietí však siahla po technológii Ethernetu vzhľadom na výhodné prenosové rýchlosti a objem prenesených dát (EtherCAT, PROFINET). Okrem káblových sietí nastal aj rozvoj v oblasti bezdrôtových priemyselných sietí (ZigBee, IWLAN) založených podobne na technológii Ethernetu. Tieto siete redukujú dodatočné káblovanie, ale sú náchylnejšie na rušenie a stratu komunikácie.

## 4.3. Simulácia SRS

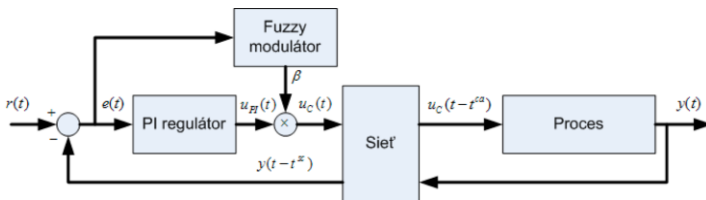
Testovanie kvality navrhnutého regulátora v SRS nie je jednoduchá úloha. Zostrojenie konkrétneho SRS nás môže stať nemalé finančné prostriedky. Ďalšie problémy môžu nastať pri zmene konfigurácie SRS. Asi najznámejším simulačným nástrojom pre SRS je TrueTime. TrueTime je nadstavbou prostredia Matlab/Simulink. (Cervin et. al. 2010). Autori TrueTime vytvorili aj iný nástroj na simuláciu oneskorenia v systémoch – Jitterbug. Jitterbug umožňuje výpočet kvadratického kritéria pre lineárne riadenie s rôznymi časovými podmienkami. (Cervin a Linconln 2010b). Ďalším simulačným nástrojom pre SRS je Network Simulátor. Ide o diskretný udalostný simulátor (dátové rámce sú reprezentované iba ako udalosti) pre simuláciu komunikačných. (INRIA 2011, Eyermann 2008). Posledným simulačným nástrojom, ktorý spomenieme je PiccSIM. PiccSIM sa skladá zo Simulinku pre simuláciu dynamických systémov a sieťového simulátora NS-2 pre simuláciu siete. Výhodou integrácie do jedného nástroja je, že môžeme sledovať aj interakcie medzi mini (Pohjola a Nethi 2009).

## 5. Fuzzy systémy v SRS

V kapitolách č.2 a č.3 sme si popísali rôzne systémy využívajúce fuzzy logiku. Povedali sme ako môžeme modelovať neurčitosti pomocou týchto systémov. V predchádzajúcej kapitole sme zasa naznačili problémy, s ktorými sa môžeme stretnúť v sieťovom riadení. Výhody fuzzy logiky sa snažili využiť rôzni autori v sieťovom riadení a v tejto kapitole si popíšeme známe metódy využitia fuzzy systémov v sieťovom riadení.

### 5.1. Fuzzy modulácia

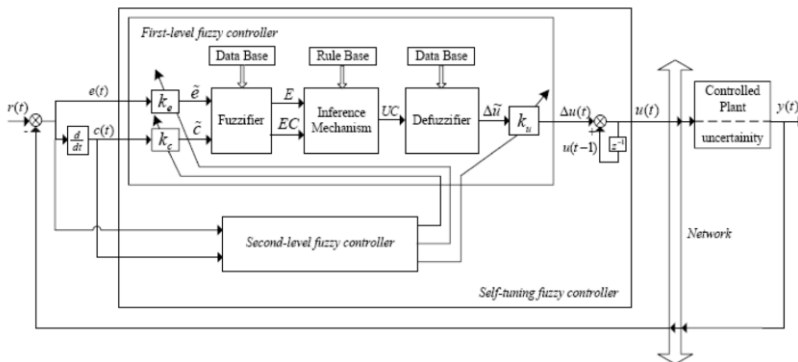
V článku (Tipsuwan a Chow 2003) bola navrhnutá fuzzy modulácia pre sieťové riadenie lineárneho procesu a PI regulátora na kompenzovanie sieťového oneskorenia. Zosilnenia PI regulátora sú vypočítavané externe na základe chyby odchýlky systému zapríčinennej oneskoreniami v sieti. Štruktúra riadenia je znázornená na nasledujúcom obrázku



Obr. 5.1 Fuzzy modulácia

## 5.2. Self-tuning Fuzzy Controller pre sieťové riadenie

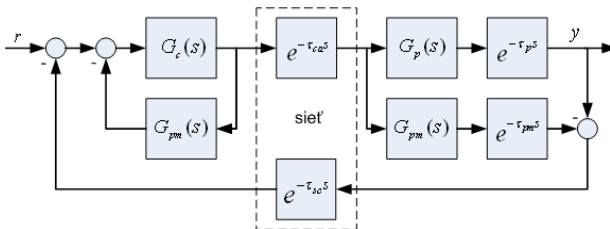
Regulátor pre sieťové riadiace systémy so stratou dát využívajúci samonastavujúci sa regulátor bol prezentovaný v článku (Tian et. al. 2007). Neurčitosti ako oneskorenie siete a strata dát sú zahrnuté do stavových rovníc. Regulátor sa skladá z dvoch fuzzy regulátorov. Prvý riadi proces priamo a druhý upravuje zosilnenia prvého regulátora. Princiálna schéma tohto regulátora je na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5.2 Self-tuning Fuzzy Controller pre SRS (Tian et. al. 2007)

## 5.3. Smithov prediktor

Smithov prediktor sa už dlhé roky využíva ako kompenzátor pre systémy s dopravným oneskorením. Vďaka jednoduchej štruktúre sa jeho využitie začalo skúmať aj v SRS. Du a kol. navrhli niekoľko modifikácií Smithovho prediktora, ktoré sa líšia zapojením jednotlivých častí alebo typom regulátora. Jednu z nich uvádzame na nasledujúcom obrázku (Du a Du 2009).



Obr. 5.3 Štruktúra Smithovho prediktora (Du a Du 2009)

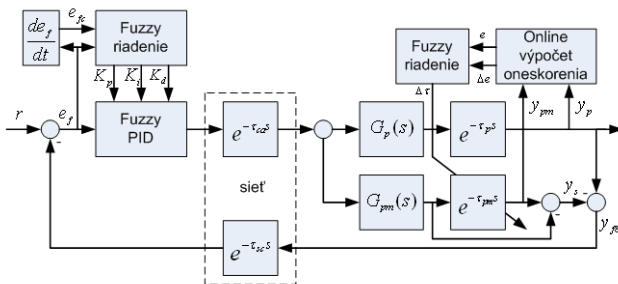
Táto štruktúra regulačného obvodu ma nasledovnú zjednodušenú prenosovú funkciu

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} e^{-\tau_{ca}s} e^{-\tau_{ps}} \quad (5.1)$$

Modifikovaná štruktúra podobne ruší vplyv dopravných oneskorení v obvode. Štruktúra nepotrebuje poznať model oneskorení, preto je vhodná pre premenlivé oneskorenia siete. Dang a kol. navrhli modifikáciu Smithovho prediktora, do ktorého pridali fuzzy adaptívny



PID regulátor a fuzzy kompenzátor dopravného oneskorenia (Dang et. al. 2011). Návrh ich štruktúry môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku



Obr. 5.4 Fuzzy adaptívny Smithov prediktor

## 5.4. Kľzavý režim v SRS

Riadenie pomocou kľzavého režimu je populárna robustná metóda, ktorá si našla uplatnenie v riadení lineárnych a nelineárnych systémov. Fuzzy logika priniesla do riadenia v kľzavom režime istú flexibilitu, pretože neznáme súčasti riadeného systému môžeme aproximovať. Z pohľadu sieťového riadenia sa však tejto metóde nevenovala dostatočná pozornosť a podľa našich dostupných informácií existujú len dve metódy pre SRS využívajúce kľzavý režim a fuzzy logiku, ktoré si popíšeme. Xu a kol. vytvorili riadenie pomocou kľzavého režimu využívajúci fuzzy logiku typu-1, v ktorom upravili plochu kľzania (Xu et. al. 2007). Uvažujme spojitý nelineárny systém s jedným vstupom popísaným nasledovne

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + B(x)u + d \quad (5.2)$$

kde  $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$  je stav systému,  $u$  je riadenie,  $f(x)$  je lineárna alebo nelineárna funkcia,  $B(x)$  je lineárna alebo nelineárna funkcia zosilnenia riadenia a  $d$  označuje poruchu systému. Pre návrh regulátora sú dané predpoklady:

1.  $f(x)$  je funkcia, ktorej horné ohraničenie poznáme  $|f(x)| \leq f_{max}$
2.  $B(x) = B_0 + \Delta B(x)$  je funkcia zosilnenia, ktorej dolné a horné ohraničenie poznáme a  $|\Delta B(x)| \leq \Delta B_{max}$ .  $B_0$  je jej nominálna hodnota
3.  $d$  je ohraničená porucha a  $|d| \leq d_{max}$

Zapojením systému (5.2) do siete vzniknú v systéme dopravné oneskorenia. Pre analýzu systému sa zaviedli predpoklady pre sieť

1. senzor a regulátor sú aktivované časom, akčný člen udalostne
2. sieťová komunikácia je bezchybná bez porúch v prenose dátových rámcov
3. oneskorenie siete je ohraničené  $0 \leq \tau \leq \tau_{max}$

Za doteraz daných predpokladov a zlúčením oneskorení môžeme systém (5.2) prepísať pomocou nasledovného vzťahu

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + B(x)u(t - \tau) + d \quad (5.3)$$

Úlohou riadiaceho systému je sledovanie referenčného signálu  $x_d$  pričom odchýlka  $e = x - x_d$  sa blíži limitne k nule pri zabezpečení stability. Zadefinujme plochu, po ktorej sa budeme kĺzať nasledovne

$$S = Ke + \int_{t-\tau}^t u(\alpha) d\alpha \quad (5.4)$$

kde  $e = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T$ ,  $\tau$  je oneskorenie siete, ktoré sa dá ohraničiť a vypočítať na základe časových značiek.  $K = [k_1, k_2, \dots, k_{n-1}, 1]^T$ ,  $\lambda^{n-1} + k_{n-1}\lambda^{n-2} + k_1$  je Hurwitzov multinominál. Ak je uzavretý regulačný obvod asymptoticky stabilný, potom keď sa systém kĺže po rovine, riadenie  $u \rightarrow 0$ , vektor chýb sa bude blížiť k nule exponenciálne a systém bude exponenciálne stabilný. Časová derivácia  $S$  je nasledovná

$$\dot{S} = \sum_{k=1}^{n-1} k_j e^{(j)} + f(x) + B_0 u(t) + \Delta B u(t - \tau) + d - x_d^{(n)} \quad (5.5)$$

Skutočná hodnota  $f(x)$  však nie je známa, preto ju musíme aproximovať pomocou fuzzy systému. Predpokladajme fuzzy systém v tvare

$$f(x) = \theta_f^T P_f(x) \quad (5.6)$$

kde  $\theta_f$  je váhový vektor, ktorý budeme adaptovať a  $P_f(x)$  je fuzzy bázová funkcia vytvorená na základe znalosti systému. Pri dostatočnej aproximácii dostávame optimálnu hodnotu

$$f^*(x) = \theta_f^{*T} P_f(x) \quad (5.7)$$

Optimálny váhový vektor je definovaný ako

$$\theta_f^* = \arg \min \left[ \sup_{x \in U_c} |\hat{f}(x) - f(x)| \right] \quad (5.8)$$

Aproximácia obsahuje chybu  $\varepsilon_f$  a preto platí

$$f(x) = f^*(x) + \varepsilon_f \quad (5.9)$$

kde  $|\varepsilon_f| \leq \eta_f^*$  a  $\eta_f^*$  predstavuje horné ohraničenie chyby aproximácie. Optimálnu hodnotu aproximácie však nedokážeme získať ľahko, preto využijeme jej odhad.

$$f(x) = f^*(x) + \varepsilon_f = \hat{f}(x) + \tilde{f}(x) + \varepsilon_f \quad (5.10)$$

kde  $\tilde{f}(x) = f^*(x) - \hat{f}(x)$  a  $\tilde{\theta}_f = \theta_f^* - \hat{\theta}_f$  predstavujú chyby odhadu. Dosadením (5.10) do (5.5) dostaneme

$$\dot{S} = \sum_{k=1}^n k_j e^{(j)} + \hat{f}(x) + \tilde{f}(x) + \varepsilon_f + B_0 u(t) + \Delta B u(t - \tau) + d - x_d^{(n)} \quad (5.11)$$

Zákony riadenia autori navrhli ako

$$u = u_f + u_s \quad (5.12)$$

$$u_f = \frac{1}{B_0} (-k_d S + x_d^{(n)} - \sum_{j=1}^{n-1} k_j e^{(j)} - \tilde{f}(\mathbf{x})) \quad (5.13)$$

$$u_s = -\frac{1}{B_0} (\hat{\eta}_f + \Delta B_{max} |u| + d_{max}) \operatorname{sgn}(S) \quad (5.14)$$

Dosadením vzťahov (5.12) a (5.13) do (5.11) dostávame

$$\dot{S} = -k_d S + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f + B_0 u_s + \Delta B u(t - \tau) + d \quad (5.15)$$

Zákony adaptácie pre neznáme hodnoty  $\hat{\theta}_f$  a  $\hat{\eta}_f$  boli navrhnuté nasledovne

$$\dot{\hat{\theta}}_f = \gamma_f P_f(\mathbf{x}) S \quad (5.16)$$

$$\dot{\hat{\eta}}_f = \gamma_{ef} |S| \quad (5.17)$$

kde  $\gamma_f$  a  $\gamma_{ef}$  sú zvolené zosilnenia adaptácie. Na základe predchádzajúcich vzťahov predstavili autori nasledujúcu vetu:

**Veta 5.1** Predpokladajme neznámy nelineárny systém (5.3), pre ktorý platia nami definované predpoklady. Ak adaptívny fuzzy systém je využitý na aproximáciu neznámej funkcie  $f(\mathbf{x})$ , zákon riadenia je daný ako (5.12), adaptívne parametre sú nastavované podľa (5.16) a (5.17), potom je plocha kĺzania asymptoticky dostupná a uzavretý regulačný systém je asymptoticky stabilný a všetky signály systému sú ohraničené v nami definovanom rozsahu.

**Dôkaz:** Zdefinujme si kvázi Ljapunovovu funkciu

$$V = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2\gamma_f} \tilde{\theta}_f^T \tilde{\theta}_f + \frac{1}{2\gamma_{ef}} \tilde{\eta}_f^2 \leq 0 \quad (5.18)$$

kde  $\tilde{\theta}_f = \theta_f^* - \hat{\theta}_f$  a  $\tilde{\eta}_f = \eta_f^* - \hat{\eta}_f$ . Derivovaním  $V$  dostávame

$$\dot{V} = S\dot{S} - \frac{1}{\gamma_f} \tilde{\theta}_f^T \dot{\hat{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}} \tilde{\eta}_f \dot{\hat{\eta}}_f \quad (5.19)$$

a po dosadení vzťahu (5.15) dostaneme

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_d S^2 + \tilde{f}(\mathbf{x}) S + \varepsilon_f S + B_0 u_s S + \\ & + \Delta B u(t - \tau) S + d S - \frac{1}{\gamma_f} \tilde{\theta}_f^T \dot{\hat{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}} \tilde{\eta}_f \dot{\hat{\eta}}_f \end{aligned} \quad (5.20)$$

Posledný vzťah môžeme ohraničiť ako

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_d S^2 + \tilde{f}(\mathbf{x}) S + \eta_f^* |S| + B_0 u_s S + \\ & + (\Delta B_{max} |u| + d_{max}) |S| - \frac{1}{\gamma_f} \tilde{\theta}_f^T \dot{\hat{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}} \tilde{\eta}_f \dot{\hat{\eta}}_f \end{aligned} \quad (5.21)$$

po využití vzťahu (5.14) a zjednodušení dostaneme

$$\dot{V} \leq -k_d S^2 + \tilde{\theta}_f^T \left( P_f(\mathbf{x})S - \frac{1}{\gamma_f} \hat{\theta}_f \right) + \tilde{\eta}_f \left( |S| - \frac{1}{\gamma_{ef}} \hat{\eta}_f \right) \quad (5.22)$$

Dosadením zákonov adaptácie (5.15) a (5.16) nakoniec dostávame

$$\dot{V} \leq -k_d S^2 \leq 0 \quad (5.23)$$

Pokiaľ ide  $t \rightarrow \infty$  a  $S \rightarrow 0$  potom chyby  $\mathbf{e} \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\theta}_f \rightarrow 0$  a  $\tilde{\eta}_f \rightarrow 0$ . Potom môžeme tvrdiť, že sme dokázali predchádzajúcu vetu. Na potlačenie kmitania známeho z riadenia v kľzavom režime autori využili náhradu saturácie pomocou fuzzy pravidiel. Simulácia bola vykonaná na riadení vesmírneho telesa. Autori spomínaného článku predstavili aj inú modifikáciu riadenia využívajúceho kľzavý režim (Dong et. al. 2009). Toto riadenie využíva nelineárny prediktor stavov a principiálne sa zhoduje s navrhnutým riadením spomenutým v tejto časti.

## 5.5. Takagi-Sugeno štruktúry

Doteraz spomínané fuzzy riadiace systémy využívali Mamdaniho model inferenčného mechanizmu. Pri riadení SRS sa využili aj systémy využívajúce Takagi-Sugeno (T-S) model (Hua et. al. 2012, ). V tomto prípade ide o reprezentáciu komplexného nelineárneho systému pomocou jednoduchých lokálnych lineárnych systémov s ich lingvistickým opisom. S využitím singleton fuzzifikácie, t-normy násobenia a ťažiskovou defuzzifikáciou môžeme celkovú dynamiku systému popísať ako

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) [A_i \mathbf{x}(t) + B_i u(t)] \quad (5.24)$$

Pre návrh regulátora v spätnej väzbe využijeme princíp PDC (Parallel distributed compensation), v ktorom fuzzy množiny sú zdieľané pre fuzzy model ako aj fuzzy regulátor (tiež v podobe T-S modelu). Regulátor má tvar

$$R^l: \text{IF } \theta_1 \text{ is } F_{l1} \text{ and ... and } \theta_n \text{ is } F_{ln} \text{ THEN} \\ u(t^+) = K_l \mathbf{x}(t - \tau_k) \quad (5.25)$$

kde  $t \in \{i_k h + \tau_k, k = 1, \dots\}$ ;  $K_i$  sú zosilnenia regulátora, ktoré potrebujeme určiť;  $h$  je doba vzorkovania;  $k = 1, 2, 3 \dots$  sú celé čísla. Oneskorenie  $\tau_k$  predstavuje čas od aktuálnej vzorky  $i_k h$  až po odoslanie dát z akčného člena. Výpočet zosilnení regulátora sa najčastejšie realizoval pomocou LMI.

## 6. Formulácia problému a ciele dizertačnej práce

Teoretická časť dizertačnej práce priniesla základné poznatky fuzzy systémov typu-1 a typu-2. Tieto systémy dokážu čiastočne modelovať neurčitosti pomocou svojich pravidiel alebo modelovaním vstupov. V ďalšej teoretickej časti sme sa venovali sieťovým riadiacim systémom. Sieťové riadiace systémy prinašajú moderný pohľad na riadenie systémov, ktoré už nie su prepojené priamo. Najväčším obmedzením pri návrhu sieťových riadiacich systémov sú negatívne vplyvy siete.

Z dostupných riešení sieťových riadiacich systémov využívajúcich fuzzy logiku prevažujú systémy využívajúce klasické modelovanie pomocou fuzzy systémov typu-1. Štruktúry navrhnuté vzhľadom na stabilitu sieťového riadiaceho systému využívajú

modelovanie systému alebo jeho časti pomocou fuzzy systému. Hlavné nedostatky spomenutých metód môžeme zhrnúť nasledovne:

1. Implementácia vzhľadom na konkrétny prípad
2. Nezaručenie stability
3. Potreba znalosti parametrov modelu systému prípadne siete
4. Nedostatočné modelovanie neurčitosti obmedzené iba na fuzzy systémy typu-1
5. Požadovaná čiastočná znalosť systému

Na základe prehľadu teórie a známych prístupov sme si stanovili nasledovné ciele:

1. Analyzovať vplyv fuzzy systémov typu-2 na sieťové riadiace systémy
2. Navrhnuť potlačenie dopravného oneskorenia pomocou kompenzátora sieťových oneskorení a fuzzy systému typu-2
3. Navrhnuť potlačenie dopravného oneskorenia pomocou stabilného adaptívneho riadenia

## 7. Analýza vplyvu fuzzy systémov typu-2 na SRS

V druhej a tretej kapitole sme si popísali fuzzy systémy typu-1 a typu-2. Oba poskytujú isté nástroje ako modelovať neúčitosti. V tejto kapitole si ukážeme aký majú vplyv fuzzy systémy typu-1 a typu-2 na kvalitu riadenia v SRS. Následne využijeme zvolený systém v reálnom modeli SRS a vyšetríme kvalitu riadenia pre dve štruktúry riadenia. Všetky simulácie sme vykonali v simulačnom prostredí Matlab/Simulink.

### 7.1. Riadený systém

Tipsuwan a Chow ukázali na príklade jednosmerného motora vplyv dopravného oneskorenia na kvalitu a stabilitu riadenia PI regulátora (Tipsuwan a Chow 2003). S využitím rovnakého systému a ekvivalentných fuzzy regulátorov, ukážeme ako dokážu potlačiť negatívne vplyvy SRS. Predpokladajme riadený systém v tvare

$$G_P(s) = \frac{2029.826}{(s+26.29)(s+2.296)} \quad (7.1)$$

a PI regulátor, ktorý bude referenčný pre naše experimenty

$$G_C(s) = \frac{0.1701(s+0.378/0.1701)}{s} \quad (7.2)$$

### 7.2. Porovnanie fuzzy systémov

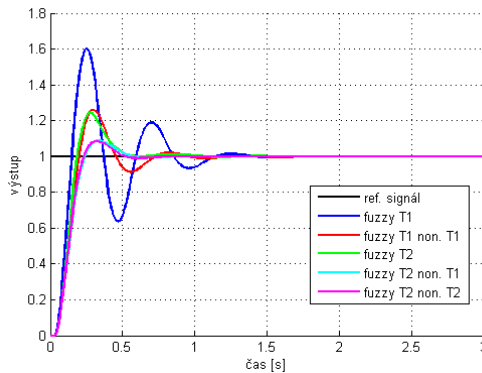
Aby sme ukázali ako sa fuzzy systémy vysporiadajú s problémami v sieti, navrhli sme porovnateľný regulátor ku PI regulátoru spomenutého v predchádzajúcej časti. Najskôr sme museli navrhnuť porovnateľný fuzzy regulátor typu-1. Intervaly pre univerzum regulátora boli pokryté piatimi Gaussovými funkciami príslušnosti typu-1 pre chybu (E) a integrál chyby (IE), ktoré sme si označili ako {NB, NS, Z, PS, PB}. Štandardnú odchýlku sme nastavili tak, aby funkcie príslušnosti pokrývali univerzum približne rovnomerne. Stredné hodnoty pre výstupné funkcie príslušnosti boli vypočítané na základe zákona riadenia PI regulátora. Takto prepočítaný fuzzy regulátor typu-1 nám bude základom pre ďalšie typy fuzzy regulátorov. Ďalšie parametre regulátorov budú pre lepšie výsledky optimalizované pomocou genetických algoritmov. Algoritmus bude hľadať parametre v rozsahu 0.001-1. Kritériom pre minimalizáciu bude IAE kritérium

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (7.3)$$

Pri fuzzy regulátore typu-1 s nesingleton fuzzifikáciou sme hľadali štandardnú odchýlku Gaussovej funkcie príslušnosti modelujúcej neurčitosť vstupov. Pre návrh fuzzy regulátora typu-2 zadefinujeme hodnotu  $\delta$ , ktorá predstavuje polovicu intervalu strednej hodnoty zo vzťahu

$$\delta = \frac{m_1 + m_2}{2} \quad (7.4)$$

Parametre delta sme hľadali pre vstupné funkcie príslušnosti typu-2 zvlášť a pre výstupné funkcie príslušnosti typu-2 univerzálne. Fuzzy regulátor typu-2 s nesingleton fuzzifikáciou typu-1 sme optimalizovali podobne ako predchádzajúci regulátor s dodatečným parametrami, ktoré reprezentoval štandardnú odchýlku Gaussovej funkcie príslušnosti typu-1 modelujúcej vstup do systému. Poslednou sadou optimalizovaných parametrov sú parametre pre fuzzy regulátor typu-2 s nesingleton fuzzifikáciou typu-2. Pri tomto type fuzzifikácie sme využili Gaussovú funkciu príslušnosti typu-2 s neurčitou štandardnou odchýlkou. Všetky fuzzy regulátory boli zapojené do simulačnej schémy, do ktorej sme pridali premenlivé dopravné oneskorenie.



Obr. 7.1 Porovnanie fuzzy systémov

Z priebehov simulácií vidíme, že fuzzy regulátor typu-1 so singleton fuzzifikáciou nepotlačil nepriaznivé vplyvy dopravných oneskorení. Pri zmene fuzzifikácie fuzzy systému typu-1 vidíme zníženie preregulovania a mierne potlačenie kmitania. Fuzzy regulátor typu-2 modeluje neurčitosť priamo v pravidlách, preto dokázal potlačiť kmitavosť prechodného deja a mierne znížil preregulovanie oproti predchádzajúcemu prípadu. Pri uvažovaní neurčitosť na vstupoch, či už s funkciou príslušnosti typu-1 alebo typu-2, sme získali opätovné zníženie preregulovania.

### 7.3. Simulácia v modeli reálnej siete

Simulácie v schéme pomocou bloku premenlivého dopravného oneskorenia nezachycujú dostatočne všetky situácie, ktoré môžu v sieti nastať. Preto je vhodnejšie využiť v simulácii model skutočnej siete. Na reprezentáciu siete sme si zvolili nástroj TrueTime a simulovali sme správanie systému pomocou bezdrôtovej siete ZigBee. Ako

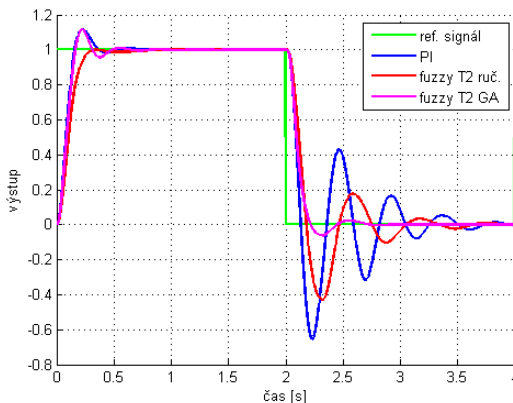
fuzzy regulátor sme vybrali fuzzy regulátor typu-2 so singleton fuzzifikáciou. Ide o kompromis medzi dostatočnou kvalitou riadenia a rýchlosti výpočtu. V nasledujúcich simuláciach sme porovnávali tri regulátory v SRS. Referenčný regulátor na porovnanie kvality regulácie bol opäť PI regulátor z predchádzajúcej časti. Naším prvým fuzzy regulátorom bol ručne navrhnutý fuzzy regulátor typu-2. Navrhnutý bol podobne ako v minulej časti pričom sme mu nastavili tieto zmenené hodnoty

- $\delta_E = \{0.75, 0.55, 0.4, 0.45, 0.6\}$
- $\delta_{IE} = \{0.075, 0.055, 0.04, 0.045, 0.06\}$
- $\delta_{OUT} = 0.5$

Musíme ešte podotknúť, že tento regulátor sme pre všetky simulácie spomenuté neskôr už nemerili. Ručne navrhnutý fuzzy regulátor typu-2 môže zlepšiť kvalitu riadenia, ale my sme chceli dosiahnuť najlepšie možné. Preto sme sa rozhodli optimalizovať všetky hodnoty  $\delta$  fuzzy regulátora typu-2. Na optimalizáciu sme si zvolili genetické algoritmy. Na porovnanie kvality riadenia PI regulátora, ručne nastaveného fuzzy regulátora typu-2 a fuzzy regulátora typu-2 optimalizovaného pomocou genetických algoritmov sme vykonali tri experimenty. Vlastnosti SRS boli nastavené tak, aby sme ovplyvnili kvalitu riadenia uzatvoreného regulačného systému.

### 7.3.1. Perióda vzorkovania

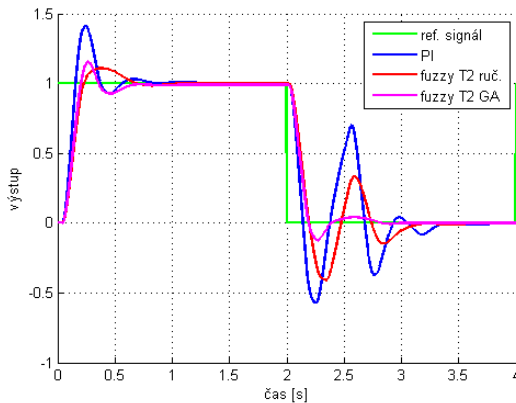
V SRS senzory zvyčajne vzorkujú procesné veličiny periodicky. Rôzne periody vzorkovania sú vhodné pre rôzne systémy na základe ich dynamiky. Zvyčajne viac vzoriek vedie k lepším vlastnostiam uzavretého regulačného obvodu. Táto skutočnosť však nevyhovuje v SRS. Časté vysielanie vzoriek po sieti môže preťažiť sieťovú komunikáciu, čo môže ovplyvniť stabilitu celého systému. V našej simulácii sme znížili periódu vzorkovania. Simulácie ukázali, že viac vzoriek preťažilo sieť a systém začal kmitať. PI regulátor zareagoval nahoršie, ale oba fuzzy regulátory typu-2 dokázali kmitanie potlačiť. Priebeh simulácie sú znázornené na nasledujúcom obrázku



Obr. 7.2 System s vzorkovaním senzora 0.00285s

### 7.3.2. Počet uzlov siete

Sieťové riadenie by nemalo výrazný zmysel, keby sme chceli riadiť iba jeden systém (zvlášť na krátku vzdialenosť). V SRS je zvyčajne zapojených niekoľko uzlov. Podobne ako pri perióde vzorkovania veľa uzlov v sieti môže samostatnú sieť preťažiť v prípade niektorých komunikačných protokolov čo opäť vedie ku nežiadanim vplyvom. V našej simulácii sme pridali ďalších 14 uzlov. V našej simulácii chcelo vyslať viacero zariadení v rovnaký čas a protokol sa musel rozhodnúť, ktorý uzol mohol vyslať. To malo za následok preťaženie siete a dopravné oneskorenie. PI regulátor nedokázal túto situáciu ošetriť. Kvalita riadenia fuzzy regulátora typu-2 bola lepšia ako je vidno na Obr. 7.3.

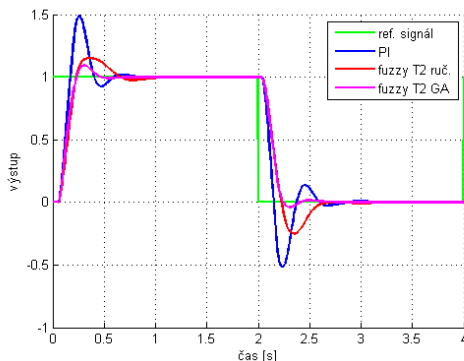


Obr. 7.3 Systém s 14 uzlami.

### 7.3.3. Výpadok dátových rámcov

S dlhými vzdialenosťami medzi uzlami siete sa niektoré informácie môžu stratiť. Strata signálu a rušenie sa vyskytuje hlavne v bezdrôtových sieťach. Pri strate dátového rámca sa môže využiť opätovné poslanie dát, ktoré je však možné iba pri systémoch s omnoho menšou periódou vzorkovania ako je samostatný prenos dát. Rýchla perióda vzorkovania a rýchly prenos dát spôsobili, že SRS sa dokázal s malým počtom výpadkov dátových rámcov vysporiadať. Preto sme nastavili vyšší výpadok dátových rámcov v sieti. PI regulátor ukázal vyššie prerogulovanie ako fuzzy regulátor typu-2. Fuzzy regulátor typu-2 potlačil kmitanie a doba ustálenia bola rýchlejšia.





Obr. 7.4 Systém s 15% výpadkom dátových rámcov.

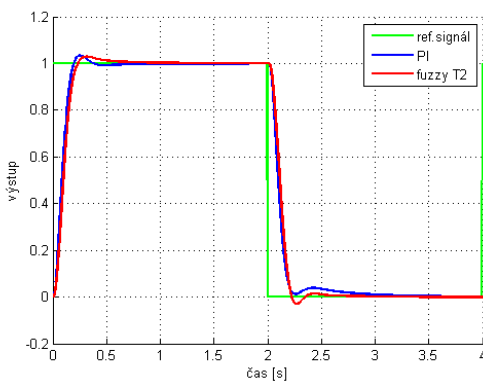
## 7.4. Využitie Smithovho prediktora

Fuzzy regulátor typu-2 sme sa rozhodli overiť aj v štruktúre riadenia, ktorá počíta z dopravnými oneskoreniami v sieti. Využili sme schému z obrázka Obr. 5.3 Štruktúra Smithovho prediktora, ktorá využíva Smithov prediktor. Model sieti bol opäť realizovaný pomocou programovej nadstavby TrueTime. Pri riadení systému sme počítali s ideálnym modelom procesu. Fuzzy regulátor typu-2 bol nastavený ručne tak, aby dokázal zlepšiť kvalitu riadenia v všetkých prípadoch. Jeho neurčitosti sme nastavili nasledovne:

- $\delta_E = \{0.6, 0.4, 0.4, 0.4, 0.6\}$
- $\delta_{IE} = \{0.06, 0.04, 0.04, 0.04, 0.06\}$
- $\delta_{OUT} = 0.2$

### 7.4.1. Perióda vzorkovania

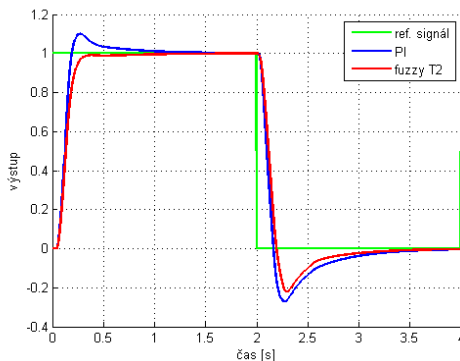
Smithov prediktor úspešne poradil s vysokou peródou vzorkovania systému a zaťaženia siete. Z odsimulovaných priebehov je vidno, že sa systém dokázal rýchlo dostať na žiadanú hodnotu referenčného signálu.



Obr. 7.5 Vplyv periódy vzorkovania

### 7.4.2. Počet uzlov siete

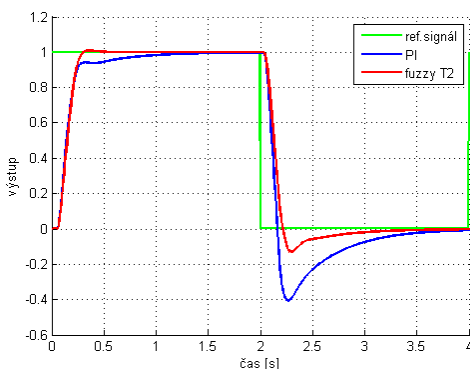
Využitie Smithovho prediktora malo zmysel aj pri sieti s viacerými uzlami. Oproti pôvodnej simulácii systém zmenšil preregulovanie a prestal kmitať. Z nasledujúceho obrázka vidno, že fuzzy regulátor typu-2 dokázal zabezpečiť lepšiu kvalitu riadenia aj keď zlepšenie nie je také výrazné.



Obr. 7.6 Vplyv preťaženia siete

### 7.4.3. Výpadok dátových rámcov

Poslednou simuláciou bol test na výpadky dátových rámcov. Štruktúra Smithovho prediktora nie je navrhnutá na takýto typ systémov. Napriek tomu dokázala riadiaca štruktúra potlačiť preregulovanie oproti pôvodným výsledkom. V tejto simulácii sa najviac prejavilo potlačenie negatívnych efektov siete pomocou fuzzy regulátora typu-2.



Obr. 7.7 Vplyv výpadkov dátových rámcov

## 8. Modifikácie kľavého režimu

V predchádzajúcej kapitole sme si ukázali ako dokážu fuzzy systémy typu-2 potlačiť nepriaznivé vplyvy siete. Testované štruktúry však majú jeden nedostatok – nezaručujú stabilitu. V tejto kapitole je našim cieľom navrhnúť riadenie, ktoré zabezpečí stabilitu

systému s využitím fuzzy systémov typu-2 a porovnať ich s rovnakým systémom využívajúcim fuzzy systém typu-1. Za základ nášho návrhu si zoberieme kľavý režim s kapitoly 5.3 a modifikujeme ho tak, aby sme dosiahli jeho všeobecnejšie využitie.

## 8.1. Modifikácia kľavého režimu z kapitoly 5.4 s premenlivým oneskorením

Algoritmus riadenia podľa kapitoly 5.3 obsahuje limitujúci predpoklad znalosti dopravného oneskorenia a preto ho môžeme považovať za pevné. V tejto časti kapitoly si ukážeme ako navrhnuť riadenie pre rovnaký systém s uvažovaním premenlivého dopravného oneskorenia a teda platí, že časová derivácia oneskorenia je ohraničená  $0 < |\dot{\tau}| \leq \eta_\tau \leq 1$ . Plocha, po ktorej sa budeme kľzať nasledovne zostáva nezmenená

$$S = Ke + \int_{t-\tau}^t u(\alpha) d\alpha \quad (8.1)$$

Časová derivácia  $S$  sa oproti prípadu v kapitole 5.3 zmení nasledovne

$$\begin{aligned} \dot{S} = \sum_{k=1}^{n-1} k_j e^{(j)} + f(\mathbf{x}) + B_0 u(t) + \Delta B u(t - \tau) + \\ B_0 \dot{\tau} u(t - \tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.2)$$

Skutočná hodnota  $f(\mathbf{x})$  nie je opäť známa. V tomto prípade ju budeme rovnako aproximovať ako v kapitole 5.3 pričom využijeme vzťahy (5.6) až (5.10). Dosadením (5.10) do (8.2) dostaneme

$$\begin{aligned} \dot{S} = \sum_{k=1}^n k_j e^{(j)} + \hat{f}(\mathbf{x}) + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f + B_0 u(t) + \\ \Delta B u(t - \tau) + B_0 \dot{\tau} u(t - \tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.3)$$

Zákony riadenia upravíme nasledovne

$$u = u_f + u_s \quad (8.4)$$

$$u_f = \frac{1}{B_0} (-k_d S + x_d^{(n)} - \sum_{j=1}^{n-1} k_j e^{(j)} - \hat{f}(\mathbf{x})) \quad (8.5)$$

$$u_s = -\frac{1}{B_0} (\hat{\eta}_f + \Delta B_{max} |u_{max}| + d_{max} + B_0 \eta_\tau |u_{max}|) \text{sgn}(S) \quad (8.6)$$

Dosadením vzťahov (8.4) a (8.5) do (8.3) dostávame

$$\dot{S} = -k_d S + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f + B_0 u_s + \Delta B u(t - \tau) + B_0 \dot{\tau} u(t - \tau) + d \quad (8.7)$$

Zákony adaptácie pre neznáme hodnoty  $\hat{\theta}_f$  a  $\hat{\eta}_f$  sme nezmenili

$$\dot{\hat{\theta}}_f = \gamma_f P_f(\mathbf{x}) S \quad (8.8)$$

$$\dot{\hat{\eta}}_f = \gamma_{ef} |S| \quad (8.9)$$

kde  $\gamma_f$  a  $\gamma_{ef}$  sú zvolené zosilnenia adaptácie. Na základe predchádzajúcich vzťahov môžeme vysloviť nasledujúcu vetu:

**Veta 8.1** Predpokladajme neznámy nelineárny systém (5.3), pre ktorý platia nami definované predpoklady. Ak adaptívny fuzzy systém je využitý na aproximáciu neznámej funkcie  $f(\mathbf{x})$ , zákon riadenia je daný ako (8.4), adaptívne parametre sú nastavované podľa (8.8) a(8.9), potom je plocha kĺzania asymptoticky dostupná a uzavretý regulačný systém je asymptoticky stabilný a všetky signály systému sú ohraničené v nami definovanom rozsahu.

**Dôkaz:** Zadefinujme si kvázi Ljapunovovu funkciu

$$V = \frac{1}{2}S^2 + \frac{1}{2\gamma_f}\tilde{\theta}_f^T\tilde{\theta}_f + \frac{1}{2\gamma_{ef}}\tilde{\eta}_f^2 \quad (8.10)$$

kde  $\tilde{\theta}_f = \theta_f^* - \hat{\theta}_f$  a  $\tilde{\eta}_f = \eta_f^* - \hat{\eta}_f$ . Derivovaním  $V$  dostávame

$$\dot{V} = S\dot{S} - \frac{1}{\gamma_f}\tilde{\theta}_f^T\dot{\hat{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}}\tilde{\eta}_f\dot{\hat{\eta}}_f \quad (8.11)$$

a po dosadení vzťahu (8.7) dostaneme

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_dS^2 + \tilde{f}(\mathbf{x})S + \varepsilon_fS + B_0u_sS + \\ & + \Delta Bu(t-\tau)S + B_0\dot{u}(t-\tau)S + dS - \frac{1}{\gamma_f}\tilde{\theta}_f^T\dot{\hat{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}}\tilde{\eta}_f\dot{\hat{\eta}}_f \end{aligned} \quad (8.12)$$

Posledný vzťah môžeme ohraničiť ako

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_dS^2 + \tilde{f}(\mathbf{x})S + \eta_f^*|S| + B_0u_sS + \\ & + (\Delta B_{max}|u_{max}| + B_0\eta_t|u_{max}| + d_{max})|S| - \frac{1}{\gamma_f}\tilde{\theta}_f^T\dot{\hat{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}}\tilde{\eta}_f\dot{\hat{\eta}}_f \end{aligned} \quad (8.13)$$

po využití vzťahu (8.6) a zjednodušení dostaneme rovnaké ohraničenie ako v pôvodnom prípade

$$\dot{V} \leq -k_dS^2 + \tilde{\theta}_f^T \left( P_f(\mathbf{x})S - \frac{1}{\gamma_f}\dot{\hat{\theta}}_f \right) + \tilde{\eta}_f \left( |S| - \frac{1}{\gamma_{ef}}\dot{\hat{\eta}}_f \right) \quad (8.14)$$

Dosadením zákonov adaptácie (8.8) a (8.9) nakoniec dostávame

$$\dot{V} \leq -k_dS^2 \leq 0 \quad (8.15)$$

Pokiaľ ide  $t \rightarrow \infty$  a  $S \rightarrow 0$  potom chyby  $\mathbf{e} \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\theta}_f \rightarrow 0$  a  $\tilde{\eta}_f \rightarrow 0$ . Potom môžeme tvrdiť, že sme dokázali predchádzajúcu vetu.

## 8.2. Modifikácia kĺzavého režimu pre systém s neznámymi parametrami a konštantným oneskorením

Modifikácie kĺzavého režimu z kapitoly 5.4 a predchádzajúcej kapitoly predpokladajú čiastočnú znalosť funkcie zosilnenia akčného zasahu. V tejto kapitole navrhujeme modifikáciu, ktorá využije jej aproximáciu. Plocha, po ktorej sa budeme kĺzať sa zmení nasledovne

$$S = Ke + \hat{B}(\mathbf{x}) \int_{t-\tau}^t u(\alpha) d\alpha \quad (8.16)$$

Rovina, po ktorej sa bude systém kĺzať obsahuje aproximáciu funkcie zosilnenia akčného zásahu. Význam aproximácie sa oproti kapitole 5.3 nemení, preto v krátkosti zopakujeme jej posledný vzťah pre obe aproximované veličiny

$$f(\mathbf{x}) = f^*(\mathbf{x}) + \varepsilon_f = \hat{f}(\mathbf{x}) + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f \quad (8.17)$$

$$B(\mathbf{x}) = B^*(\mathbf{x}) + \varepsilon_b = \hat{B}(\mathbf{x}) + \tilde{B}(\mathbf{x}) + \varepsilon_b \quad (8.18)$$

kde  $\tilde{f}(\mathbf{x}) = f^*(\mathbf{x}) - \hat{f}(\mathbf{x})$ ,  $\tilde{\theta}_f = \theta_f^* - \hat{\theta}_f$ ,  $\tilde{B}(\mathbf{x}) = B^*(\mathbf{x}) - \hat{B}(\mathbf{x})$  a  $\tilde{\theta}_b = \theta_b^* - \hat{\theta}_b$  predstavujú chyby odhadu a platí, že  $|\varepsilon_f| \leq \eta_f^*$  a  $|\varepsilon_b| \leq \eta_b^*$ .  $\eta_f^*$  a  $\eta_b^*$  predstavujú horné ohraničenie chyby aproximácie funkcií. Časová derivácia  $S$  je daná nasledovne

$$\begin{aligned} \dot{S} = \sum_{k=1}^{n-1} k_j e^{(j)} + \hat{B}(\mathbf{x})u(t) - \hat{B}(\mathbf{x})u(t-\tau) + f(\mathbf{x}) + \\ B(\mathbf{x})u(t-\tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.19)$$

Skutočné hodnoty  $f(\mathbf{x})$  a  $B(\mathbf{x})$  sú neznáme a preto ich budeme aproximovať pomocou (8.17) a (8.18).

$$\begin{aligned} \dot{S} = \sum_{k=1}^{n-1} k_j e^{(j)} + \hat{B}(\mathbf{x})u(t) - \hat{B}(\mathbf{x})u(t-\tau) + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \hat{f}(\mathbf{x}) + \\ \varepsilon_f + (\tilde{B}(\mathbf{x}) + \hat{B}(\mathbf{x}) + \varepsilon_b)u(t-\tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.20)$$

a po uprave dostaneme

$$\begin{aligned} \dot{S} = \sum_{k=1}^{n-1} k_j e^{(j)} + \hat{B}(\mathbf{x})u(t) + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \hat{f}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f + \\ \tilde{B}(\mathbf{x})u(t-\tau) + \varepsilon_b u(t-\tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.21)$$

Zákony riadenia zvolíme nasledovne

$$u = u_f + u_s \quad (8.22)$$

$$u_f = \frac{1}{\hat{B}(\mathbf{x})} (-k_d S + x_d^{(n)} - \sum_{j=1}^{n-1} k_j e^{(j)} - \hat{f}(\mathbf{x})) \quad (8.23)$$

$$u_s = -\frac{1}{\hat{B}(\mathbf{x})} (\hat{\eta}_f + \hat{\eta}_b |u_{max}| + d_{max}) \operatorname{sgn}(S) \quad (8.24)$$

Dosadením vzťahov (8.22) a (8.23) do (8.21) dostávame

$$\begin{aligned} \dot{S} = -k_d S + \hat{B}(\mathbf{x})u_s + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f + \\ \tilde{B}(\mathbf{x})u(t-\tau) + \varepsilon_b u(t-\tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.25)$$

Zákony adaptácie pre neznáme hodnoty  $\hat{\theta}_f$ ,  $\hat{\theta}_b$ ,  $\hat{\eta}_f$  a  $\hat{\eta}_b$  sme zadefinovali

$$\dot{\hat{\theta}}_f = \gamma_f P_f(\mathbf{x}) S \quad (8.26)$$

$$\hat{\eta}_f = \gamma_{ef}|S| \quad (8.27)$$

$$\hat{\theta}_b = \gamma_b P_b(\mathbf{x})|u_{max}|S \quad (8.28)$$

$$\hat{\eta}_b = \gamma_{eb}|u_{max}||S| \quad (8.29)$$

kde  $\gamma_f$ ,  $\gamma_b$ ,  $\gamma_{ef}$  a  $\gamma_{eb}$  sú zvolené zosilnenia adaptácie. Na základe predchádzajúcich vzťahov môžeme vysloviť nasledujúcu vetu:

**Veta 8.2** Predpokladajme neznámy nelineárny systém (5.3), pre ktorý platia nami definované predpoklady. Ak adaptívny fuzzy systém je využitý na aproximáciu neznámej funkcie  $f(\mathbf{x})$  a  $B(\mathbf{x})$ , zákon riadenia je daný ako (8.22), adaptívne parametre sú nastavované podľa (8.26) až (8.31), potom je plocha kĺzania asymptoticky dostupná a uzavretý regulačný systém je asymptoticky stabilný a všetky signály systému sú ohraničené v nami definovanom rozsahu.

**Dôkaz:** Zdefinujme si kvázi Ljapunovovu funkciu

$$V = \frac{1}{2}S^2 + \frac{1}{2\gamma_f}\tilde{\theta}_f^T\tilde{\theta}_f + \frac{1}{2\gamma_{ef}}\tilde{\eta}_f^2 + \frac{1}{2\gamma_b}\tilde{\theta}_b^T\tilde{\theta}_b + \frac{1}{2\gamma_{eb}}\tilde{\eta}_b^2 \quad (8.30)$$

kde  $\tilde{\theta}_f = \theta_f^* - \hat{\theta}_f$ ,  $\tilde{\theta}_b = \theta_b^* - \hat{\theta}_b$ ,  $\tilde{\eta}_f = \eta_f^* - \hat{\eta}_f$  a  $\tilde{\eta}_b = \eta_b^* - \hat{\eta}_b$ . Derivovaním  $V$  dostávame

$$\dot{V} = S\dot{S} - \frac{1}{\gamma_f}\tilde{\theta}_f^T\dot{\tilde{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}}\tilde{\eta}_f\dot{\tilde{\eta}}_f - \frac{1}{\gamma_b}\tilde{\theta}_b^T\dot{\tilde{\theta}}_b - \frac{1}{\gamma_{eb}}\tilde{\eta}_b\dot{\tilde{\eta}}_b \quad (8.31)$$

a po dosadení vzťahu (8.25) dostaneme

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_d S^2 + \tilde{B}(\mathbf{x})u_s S + \tilde{f}(\mathbf{x})S + \varepsilon_f S + \tilde{B}(\mathbf{x})u(t - \tau)S \\ & + \varepsilon_b u(t - \tau)S + dS - \frac{1}{\gamma_f}\tilde{\theta}_f^T\dot{\tilde{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}}\tilde{\eta}_f\dot{\tilde{\eta}}_f - \frac{1}{\gamma_b}\tilde{\theta}_b^T\dot{\tilde{\theta}}_b - \frac{1}{\gamma_{eb}}\tilde{\eta}_b\dot{\tilde{\eta}}_b \end{aligned} \quad (8.32)$$

Posledný vzťah môžeme ohraničiť ako

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_d S^2 + \tilde{B}(\mathbf{x})u_s S + \tilde{f}(\mathbf{x})S + \eta_f^*|S| + \eta_b^*|u_{max}||S| \\ & + \tilde{B}(\mathbf{x})|u_{max}|S + (\hat{\eta}_f + \hat{\eta}_b|u_{max}| + d_{max})|S| \\ & - \frac{1}{\gamma_f}\tilde{\theta}_f^T\dot{\tilde{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}}\tilde{\eta}_f\dot{\tilde{\eta}}_f \end{aligned} \quad (8.33)$$

po využití vzťahu (8.24) a zjednodušení dostaneme ohraničenie

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_d S^2 + \tilde{\theta}_f^T \left( P_f(\mathbf{x})S - \frac{1}{\gamma_f}\hat{\theta}_f \right) + \tilde{\eta}_f \left( |S| - \frac{1}{\gamma_{ef}}\hat{\eta}_f \right) \\ & + \tilde{\theta}_b^T \left( P_b(\mathbf{x})|u_{max}|S - \frac{1}{\gamma_b}\hat{\theta}_b \right) + \tilde{\eta}_b \left( |u_{max}||S| - \frac{1}{\gamma_{eb}}\hat{\eta}_b \right) \end{aligned} \quad (8.34)$$

Dosadením zákonov adaptácie (8.26) až (8.29) nakoniec dostávame

$$\dot{V} \leq -k_d S^2 \leq 0 \quad (8.35)$$

Pokiaľ ide  $t \rightarrow \infty$  a  $S \rightarrow 0$  potom chyby  $e \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\theta}_f \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\theta}_b \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\eta}_f \rightarrow 0$  a  $\tilde{\eta}_b \rightarrow 0$ . Potom môžeme tvrdiť, že sme dokázali predchádzajúcu vetu.

### 8.3. Modifikácia kĺzavého režimu pre systém s neznámymi parametrami a premenlivým oneskorením

V tejto kapitole navrhne modifikáciu algoritmu z predchádzajúcej kapitoly, ktorá využije premenlivé dopravné oneskorenie. Popis systému a predpoklady zostáva z kapitoly 8.1. Plocha, po ktorej sa budeme kĺzať sa zmení nasledovne

$$S = Ke + \hat{B}(\mathbf{x}) \int_{t-\tau}^t u(\alpha) d\alpha \quad (8.36)$$

Rovina, po ktorej sa bude systém kĺzať obsahuje aproximáciu funkcie zosilnenia akčného zasahu. Aproximácia funkcií  $f(\mathbf{x})$  a  $B(\mathbf{x})$  sa oproti predchádzajúcej kapitole nemení. Časová derivácia  $S$  je daná nasledovne

$$\begin{aligned} \dot{S} = \sum_{k=1}^{n-1} k_j e^{(j)} + \hat{B}(\mathbf{x})u(t) - \hat{B}(\mathbf{x})(1 - \dot{\tau})u(t - \tau) + f(\mathbf{x}) + \\ B(\mathbf{x})u(t - \tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.37)$$

Skutočné hodnoty  $f(\mathbf{x})$  a  $B(\mathbf{x})$  sú neznáme a preto ich budeme aproximovať pomocou (8.17) a (8.18).

$$\begin{aligned} \dot{S} = \sum_{k=1}^{n-1} k_j e^{(j)} + \hat{B}(\mathbf{x})u(t) + \hat{B}(\mathbf{x})\dot{\tau}u(t - \tau) + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \hat{f}(\mathbf{x}) + \\ \varepsilon_f + \tilde{B}(\mathbf{x})u(t - \tau) + \varepsilon_b u(t - \tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.38)$$

Zákony riadenia zvolíme nasledovne

$$u = u_f + u_s \quad (8.39)$$

$$u_f = \frac{1}{\hat{B}(\mathbf{x})} (-k_d S + x_d^{(n)} - \sum_{j=1}^{n-1} k_j e^{(j)} - \hat{f}(\mathbf{x})) \quad (8.40)$$

$$u_s = -\frac{1}{\hat{B}(\mathbf{x})} (\hat{\eta}_f + \hat{\eta}_b |u_{max}| + d_{max} + \hat{B}(\mathbf{x})\eta_t |u_{max}|) \operatorname{sgn}(S) \quad (8.41)$$

Dosadením vzťahov (8.39) a (8.40) do (8.38) dostávame

$$\begin{aligned} \dot{S} = -k_d S + \hat{B}(\mathbf{x})u_s + \hat{B}(\mathbf{x})\dot{\tau}u(t - \tau) + \tilde{f}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f + \\ \tilde{B}(\mathbf{x})u(t - \tau) + \varepsilon_b u(t - \tau) + d - x_d^{(n)} \end{aligned} \quad (8.42)$$

Zákony adaptácie pre neznáme hodnoty  $\hat{\theta}_f$ ,  $\hat{\theta}_b$ ,  $\hat{\eta}_f$  a  $\hat{\eta}_b$  sme zadefinovali

$$\dot{\hat{\theta}}_f = \gamma_f P_f(\mathbf{x}) S \quad (8.43)$$

$$\dot{\hat{\eta}}_f = \gamma_{ef} |S| \quad (8.44)$$

$$\hat{\theta}_b = \gamma_b P_b(\mathbf{x}) |u_{max}| S \quad (8.45)$$

$$\hat{\eta}_b = \gamma_{eb} |u_{max}| |S| \quad (8.46)$$

kde  $\gamma_f$ ,  $\gamma_b$ ,  $\gamma_{ef}$  a  $\gamma_{eg}$  sú zvolené zosilnenia adaptácie. Na základe predchádzajúcich vzťahov môžeme vysloviť nasledujúcu vetu:

**Veta 8.3** Predpokladajme neznámy nelineárny systém (5.3), pre ktorý platia nami definované predpoklady. Ak adaptívny fuzzy systém je využitý na aproximáciu neznámej funkcie  $f(\mathbf{x})$  a  $B(\mathbf{x})$ , zákon riadenia je daný ako (8.39), adaptívne parametre sú nastavované podľa (8.43) až (8.46), potom je plocha kĺzania asymptoticky dostupná a uzavretý regulačný systém je asymptoticky stabilný a všetky signály systému sú ohraničené v nami definovanom rozsahu.

**Dôkaz:** Zadefinujme si kvázi Ljapunovovu funkciu

$$V = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2\gamma_f} \tilde{\theta}_f^T \tilde{\theta}_f + \frac{1}{2\gamma_{ef}} \tilde{\eta}_f^2 + \frac{1}{2\gamma_b} \tilde{\theta}_b^T \tilde{\theta}_b + \frac{1}{2\gamma_{eb}} \tilde{\eta}_b^2 \quad (8.47)$$

kde  $\tilde{\theta}_f = \theta_f^* - \hat{\theta}_f$ ,  $\tilde{\theta}_b = \theta_b^* - \hat{\theta}_b$ ,  $\tilde{\eta}_f = \eta_f^* - \hat{\eta}_f$  a  $\tilde{\eta}_b = \eta_b^* - \hat{\eta}_b$ . Derivovaním  $V$  dostávame

$$\dot{V} = S\dot{S} - \frac{1}{\gamma_f} \tilde{\theta}_f^T \hat{\theta}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}} \tilde{\eta}_f \hat{\eta}_f - \frac{1}{\gamma_b} \tilde{\theta}_b^T \hat{\theta}_b - \frac{1}{\gamma_{eb}} \tilde{\eta}_b \hat{\eta}_b \quad (8.48)$$

a po dosadení vzťahu (8.25) dostaneme

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_d S^2 + \hat{B}(\mathbf{x}) u_s S + \hat{B}(\mathbf{x}) \dot{t} u(t - \tau) + \check{f}(\mathbf{x}) S \\ & + \hat{B}(\mathbf{x}) u(t - \tau) S + \varepsilon_f S + \varepsilon_b u(t - \tau) S + dS - \frac{1}{\gamma_f} \tilde{\theta}_f^T \hat{\theta}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}} \tilde{\eta}_f \hat{\eta}_f - \\ & \frac{1}{\gamma_b} \tilde{\theta}_b^T \hat{\theta}_b - \frac{1}{\gamma_{eb}} \tilde{\eta}_b \hat{\eta}_b \end{aligned} \quad (8.49)$$

Posledný vzťah môžeme ohraničiť ako

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_d S^2 + \hat{B}(\mathbf{x}) u_s S + \check{f}(\mathbf{x}) S + \eta_f^* |S| + \eta_b^* |u_{max}| |S| \\ & + \hat{B}(\mathbf{x}) |u_{max}| S + (\hat{\eta}_f + \hat{\eta}_b |u_{max}| + d_{max} + \hat{B}(\mathbf{x}) \eta_t |u_{max}|) |S| - \\ & \frac{1}{\gamma_f} \tilde{\theta}_f^T \hat{\theta}_f - \frac{1}{\gamma_{ef}} \tilde{\eta}_f \hat{\eta}_f \end{aligned} \quad (8.50)$$

po využití vzťahu (8.41) a zjednodušení dostaneme ohraničenie

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_d S^2 + \tilde{\theta}_f^T \left( P_f(\mathbf{x}) S - \frac{1}{\gamma_f} \hat{\theta}_f \right) + \tilde{\eta}_f \left( |S| - \frac{1}{\gamma_{ef}} \hat{\eta}_f \right) \\ & + \tilde{\theta}_b^T \left( P_b(\mathbf{x}) |u_{max}| S - \frac{1}{\gamma_b} \hat{\theta}_b \right) + \tilde{\eta}_b \left( |u_{max}| |S| - \frac{1}{\gamma_{eb}} \hat{\eta}_b \right) \end{aligned} \quad (8.51)$$

Dosadením zákonov adaptácie (8.43) až (8.46) nakoniec dostávame

$$\dot{V} \leq -k_d S^2 \leq 0 \quad (8.52)$$



Pokiaľ ide  $t \rightarrow \infty$  a  $S \rightarrow 0$  potom chyby  $e \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\theta}_f \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\theta}_b \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\eta}_f \rightarrow 0$  a  $\tilde{\eta}_b \rightarrow 0$ . Potom môžeme tvrdiť, že sme dokázali predchádzajúcu vetu.

#### 8.4. Simulačné overenie riadiacich systémov

Na overenie našich riadiacich systémov sme použili model vesmírnej lode z článku (Xu et. al. 2007). Zjednodušená dynamika systému sa dá opísať nasledujúcim vzťahom

$$(J_0 + \Delta J)\dot{\omega} = -\Omega(J_0 + \Delta J)\omega + M + d \quad (8.53)$$

kde  $J_0 \in R^{3 \times 3}$  je nominálna matica momentov zotrvačnosti,  $\Delta J \in R^{3 \times 3}$  je jej neurčitá časť spôsobená napríklad spotrebou paliva alebo zmenou záťaže,  $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$  predstavuje vektor uhlových rýchlostí,  $M$  je riadiaci vektor krútiaceho momentu,  $d = (d_1, d_2, d_3)^T$  sú vonkajšie poruchy krútiaceho momentu. Matica  $\Omega$  je daná ako

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.54)$$

Dynamika orientácie vesmírnej lode je popísaná kinematickými rovnicami na osiach tela

$$\dot{\theta} = R(\theta)\omega \quad (8.55)$$

kde  $\theta = [\gamma, \psi, \varphi]^T$  a prvky vektora  $\theta$  predstavujú uhly natočenia, smeru a stúpania (roll, yaw, pitch). Stavové veličiny systému môžeme zapísať ako

$$z = [\gamma, \dot{\gamma}, \psi, \dot{\psi}, \varphi, \dot{\varphi}] = [z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6] \quad (8.56)$$

Dynamiku vesmírnej lode môžeme rozdeliť na tri nelineárne subsystémy pričom budeme využívať iba subsystém natočenia:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ z_2 &= f_1(z) + b_1(z)u_1 + d_1 \end{aligned} \quad (8.57)$$

kde  $f_1(z) = \frac{J_2 - J_3}{J_1} z_4 z_6$ ,  $b_1(z) = \frac{1}{J_1}$ . Autori článku pracovali s nasledovnými parametrami systému a riadenia:

Tab. 8.1 Parametre systému a riadenia

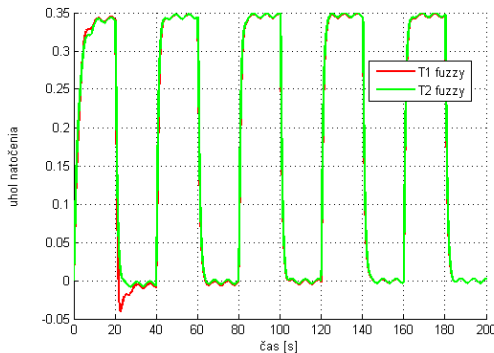
$J_0$	$diag(87.2, 86.5, 113.8) [kgm^2]$
$\Delta J_i$	$5 \sin(t) [kgm^2]$
$\omega_x, \omega_z$	$0.001 [rad/s]$
$\omega_y$	$-0.005 [rad/s]$
$d_1, d_3$	$-0.005 \sin(t)$
$d_2$	$0.005 \sin(t)$
$k_1$	1.1
$k_d$	5
$\gamma(0), \psi(0), \varphi(0)$	0 [rad]

Sieťové oneskorenie je ohraničené nasledovne  $0 \leq \tau \leq \tau_{max} = 0.07$ . Cieľom simulácií je riadiť systém z ustálenej polohy na želaný uhol 0.35 rad. a po 20 sekundách sa vrátiť do ustálenej polohy. Na zjednodušenie sme neriadili všetky uhly naraz, ale len uhol natočenia. Dynamiku zvyšných uhlov sme menili pomocou prenosovej funkcie v želaných hodnotách

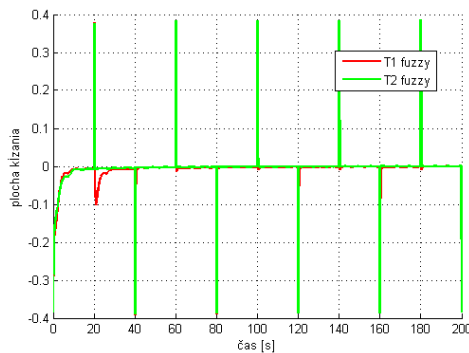
$$z_4, z_6 = \frac{1}{0.5s + 1} \quad (8.58)$$

#### 8.4.1. Simulácia riadiaceho systému z kapitoly č. 5.4

Skôr ako sme začali overovať riešenia sme simulovali riadiaci systém z kapitoly č. 5.3, aby sme mohli porovnať fuzzy regulátor typu-1 a fuzzy regulátor typu-2 pri pôvodnom návrhu. Každý vstup fuzzy systému bol modelovaný troma fuzzy funkciami príslušnosti, ktoré boli rozložené rovnomerne a pokrývali interval  $[0, 0.35]$ . Strednú hodnotu mali nasledovne  $\{Z, S, B\} = \{0, 0.175, 0.35\}$ . Kombináciou vstupov sme získali plnú bázu pravidiel pričom výstupy sme jednotne nastavili na 1. Zosilnenia  $\gamma_f = 2$  a  $\gamma_{ef} = 0.5$ . Pre fuzzy regulátor sme uvažovali neurčitost' vstupov a výstupov 0.2. Výsledky simulácií sú zobrazené na nasledujúcich obrázkoch.



Obr. 8.1 Uhol natočenia

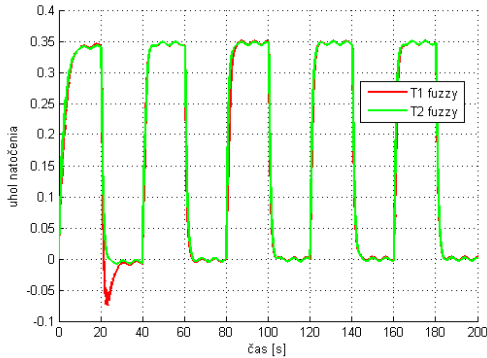


Obr. 8.2 Plocha klzania

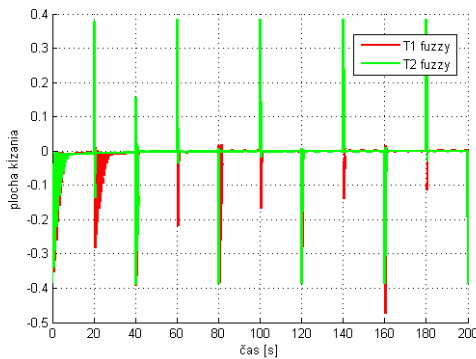
Z obrázkov je zrejmé, že riadiaci systém je stabilný a blíži sa k želanej hodnote. Fuzzy regulátor typu-2 dokáže zabezpečiť lepšiu kvalitu regulácie oproti fuzzy regulátoru typu-1. Naše pozorovania dokazujú aj kritéria kvality.

#### 8.4.2. Simulácia riadiaceho systému z kapitoly č. 8.1

V systéme z predchádzajúcej časti sme zmenili pevné dopravné oneskorenie za premenlivé. Nastavili sme ho tak, aby spĺňalo naše predpoklady. Okrem prídavného člena v zákone riadenia sme na simulačnej schéme nič nemenili. Výsledky simulácií sú na nasledujúcich obrázkoch



Obr. 8.3 Úhol natočenia



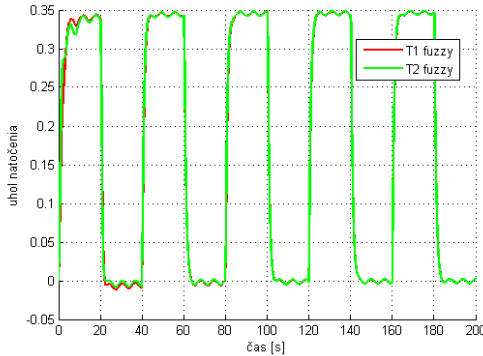
Obr. 8.4 Plocha klzania

Z priebehov je zrejmé, že premenlivé dopravné oneskorenie malo výrazný vplyv na kvalitu riadenia. Podobne ako v predchádzajúcej časti reguloval lepšie fuzzy regulátor typu-2, ktorý dokázal lepšie tmiť kmity. Kritéria kvality riadenia sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke.

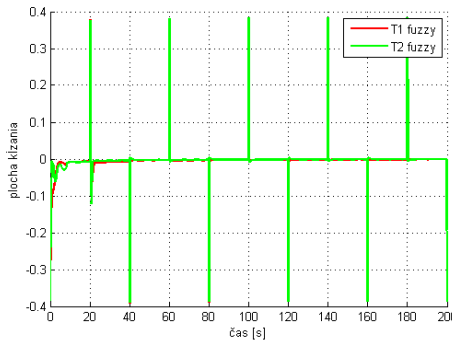
#### 8.4.3. Simulácia riadiaceho systému z kapitoly č. 8.2

Predchádzajúci riadiace systémy sme rozšírili o riadenie pomocou 2 aproximátorov. Druhý aproximuje inverziu funkcie zosilnenia riadenia. To nám umožňuje modelovať jej

vstup v intervale  $[-1, 1]$ , pretože je funkciou sínusu. Na pokrytie jedného vstupu sme využili rovnomerné rozloženie 5 funkcií príslušnosti. Výstup bol nastavený na hodnotu 60. Neurčitosti fuzzy regulátora typu-2 boli zvolené 0.2 na vstupe a 2 na výstupe. Zvyšné parametre sa nemenili a nové zosilnenia sme nastavili ako  $\gamma_b = -5$  a  $\gamma_{eb} = 0.1$ . Dopravné oneskorenie bolo opäť konštantné. Výsledky simulácií sú nasledovné



Obr. 8.5 Uhol natočenia

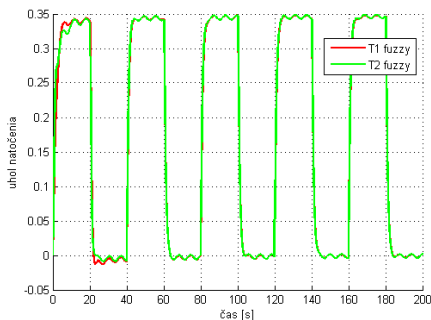


Obr. 8.6 Plocha kĺzania

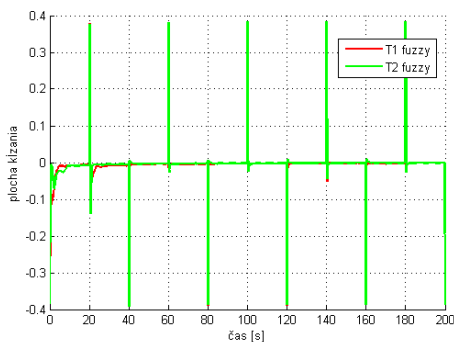
Z priebehov je vidno, že dodatočná aproximácia nezhoršila kvalitu riadenia a naopak ju zlepšila. Znovu sa potvrdila výhoda fuzzy regulátora typu-2.

#### 8.4.4. Simulácia riadiaceho systému z kapitoly č. 8.3

Poslednou sadou experimentov bolo využitie aproximácie v riadiacom sieťovom systéme s premenlivým dopravným oneskorením. Oproti predchádzajúcemu experimentu sme parametre systému nemenili. Výsledky simulácie sú na nasledujúcich obrázkoch



Obr. 8.7 Uhol natočenia



Obr. 8.8 Plocha klzania

Výsledky ukázali, že na rozdiel od algoritmu z kapitoly č. 8.2 dokázala aproximácia potlačiť vplyv premenlivého dopravného oneskorenia na systém. Nevýhodou je pomalšie ustáľovanie sa na želanú hodnotu.

## 9. Záver

Predložená práca sa venuje modelovaniu a riadeniu sieťových riadiacich systémov pomocou fuzzy logiky typu-1 a typu-2. Na začiatku práce sme sa venovali fuzzy systémom typu-1. Rozšírenie fuzzy logiky o pokročilé modelovanie neurčitosti prinášajú fuzzy systémy typu-2. Tieto systémy dokážu modelovať neurčitosti v pravidlách a na vstupe čo môže viesť k zvýšeniu presnosti.

Moderné výrobné systémy začínajú s obľubou využívať sieťové riadiace systémy. Systémy môžu využívať káblovú prípadne bezdrôtovú komunikáciu. S mnohými výhodami však prichádzajú nevýhody. Najčastejšie skúmané sú dopravné oneskorenia a výpadky dátových rámcov. Tieto nevýhody môžeme považovať za neurčitosti a modelovať ich pomocou systémov fuzzy logiky či už typu-1 alebo typu-2. Naším cieľom preto bolo analyzovať možnosti fuzzy systémov typu-2 a navrhnuť riadiace štruktúry, ktoré by potlačili negatívne vplyvy siete.

Analýza vplyvu fuzzy systémov na sieťové riadiace systémy bola vykonaná v kapitole č.7. Kvalitu riadenia sme sledovali, ako pre všetky dostupné fuzzy systémy typu-1, tak typu-2. Ukázalo sa, že čím viac počíta štruktúra regulátora s neurčitosťami siete, tým lepšiu kvalitu riadenia vieme dosiahnuť. Fuzzy systémy typu-2 sme overili v riadiacích štruktúrach pomocou modelu reálnej siete.

Modifikácie riadenia využívajúce kľzavý režim sme navrhli v kapitole č.8. Pôvodné riešenie bolo skúmané s využitím fuzzy systémov typu-1 a typu-2 a zároveň sme skúmali ich vplyv na kvalitu riadenia. Taktiž sme modifikovali riešenie tak, aby uvažovalo potlačiť vplyv premenlivého oneskorenia siete. Výsledky simulácií ukázali, že navrhnuté riadiace systémy zostali stabilné a dokázali potlačiť negatívne vplyvy siete a poruchy. Modifikácia využívajúca aproximáciu funkcie zosilnenia síce nedosahuje takú kvalitu riadenia, ako pôvodné riešenie, avšak nepotrebuje uvažovať dodatočné informácie.

Prínosy predloženej práce môžeme teda zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- zhrnutie teórie fuzzy systémov typu-1 a typu-2
- prehľad sieťových riadiacích systémov so zameraním na ich nedostatky, reálne nasadenie a možnosť modelovania
- prehľad riadiacích štruktúr využívajúcich fuzzy systémy typu-1 a typu-2 v sieťových riadiacích systémoch
- realizácia analýzy vplyvu rôznych fuzzy systémov na sieťové riadiace systémy
- návrh a realizácia riadiacích štruktúr využívajúcich riadenie pomocou kľzavého režimu a ich simulačné overenie

## Použitá literatúra

### Publikované práce autora

Blaho, M. Foltin, M. Murgaš, J. Farkas, L. (2010). Advantages of Type-2 Fuzzy Logic in Networked Control Systems. In: *Technical Computing Bratislava 2010 : 18th Annual Conference Proceedings*. Bratislava, Slovak Republic, 20.10.2010. - Bratislava : RT Systems, 2010. - ISBN 978-80-970519-0-7. - CD-Rom

Blaho, M. Urban, M. Fodrek, P. Foltin, M. (2012) Wireless Network Effect on PI and Type-2 Fuzzy Logic Controller. In: *International Journal of Communications*. - ISSN 1998-4480. - Vol. 6, Iss. 1 (2012), s. 18-25

Blaho, M. Mraľko, L. Urban, M. Murgaš, J. (2011) Networked Control Systems with PROFINET and IWLAN. In: *Recent Advances in Manufacturing Engineering : 4th International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems*. Barcelona, Spain, September 15-17, 2011. - : WSEAS Press, 2011. - ISBN 978-1-61804-031-2. - S. 219-223

Blaho, M. Urban, M. Foltin, M. (2011) Type-2 Fuzzy Controller in ZigBee Network. In: *Recent Researches in Engineering and Automatic Control : ECC'11: 2nd European Conference of Control, ECME'11: 2nd European Conference of Mechanical Engineering, ECCIE'11: 2nd European Conference of Civil Engineering, ECCE'11: 2nd European Conference of Chemical Engineering*; Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain, 10.-12. December 2011. - : WSEAS Press, 2011. - ISBN 978-1-61804-057-2. - S. 59-63

- Blaho, M. Ozimy, J. Ernek, M. Foltin, M (2011) ZigBee Implementation in Railroad Model. In: *Technical Computing Prague 2011 : 19th Annual Conference Proceedings*. Prague, Czech Republic, November 8, 2011. - Prague : Institute of Chemical Technology, 2011. - ISBN 978-80-7080-794-1. - CD-Rom
- Blaho, M. Kratmüller, M. (2007) Fuzzy metódy v algoritmoch SRS. In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*. - ISSN 1335-2547. - Roč. 13, mimoriadne č (2007), s. 273-275
- Blaho, M. Farkas, L. Chvostek, T. Poliačik, M (2007) Reducing Influence of Time Delay in NCS with MRAC Controller. In: *Process Control 2007 : 16th International Conference*. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 11.-14.6.2007. - Bratislava : STU v Bratislave ChtF, 2007. - ISBN 978-80-227-2677-1. - CD-Rom
- Blaho, M. Foltin, M. Fodrek, P. Poliačik, M. (2010) Preparing Advanced Matlab Users. In: *WSEAS Transactions on Advances in Engineering Education*. - ISSN 1790-1979. - Vol. 7, Iss. 7 (2010), s. 234-243
- Blaho, M. Foltin, M. Fodrek, P. Murgaš, J. (2012). Students Perspective on Improving Programming Courses. In: *International Journal of Education and Information Technologies*. - ISSN 2074-1316. - Vol. 6, Iss.1 (2012), s. 17-24
- Blaho, M. Farkas, L. (2007) Modeling and Control of DEDS Using Stateflow. In: *Technical Computing Prague 2007 : 15th Annual Conference Proceedings*. Prague, Czech Republic, 14.11.2007. - Praha : Humusoft s.r.o, 2007. - ISBN 978-80-7080-658-6. - CD-Rom
- Blaho, M. Foltin, M. Nagy, P. Hudáček, M. Kopčok, K. (2009) Operations Scheduling for Manufacturing Systems with Parallel Computing. - , 2009. In: *Technical Computing Prague 2009 : 17th Annual Conference Proceedings*. Prague, Czech Republic, 19.11.2009. - Prague : Humusoft, Ltd., 2009. - ISBN 978-80-7080-733-0. - CD-Rom
- Blaho, M. Foltin, M. Fodrek, P. Murgaš, J. (2010). Research on Preparing Control Engineers and Advanced Matlab Users. In: *Latest Trends on Engineering Education : 7th WSEAS International Conference on Engineering Education*. Corfu, Greece, 22.-24.7.2010. - : WSEAS Press, 2010. - ISBN 978-960-474-202-8. - S. 211-214
- Blaho, M. Foltin, M. Fodrek, P. Murgaš, J. (2011) Student's Diversity Problem in Programming Courses. In: *Recent Researches in Educational Technologies : Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Engineering Education (EDUCATION'11) and 2nd International Conference on Education and Educational Technologies (WORLD-EDU'11)*. Corfu Island, Greece, July 14-16,2011. - : WSEAS Press, 2011. - ISBN 978-1-61804-021-3. - S. 127-130
- Blaho, M. Pálffy, J. Schindler, F. (2010) Improved XML Processing and Usage of Web Services in Matlab. In: *Technical Computing Bratislava 2010 : 18th Annual Conference Proceedings*. Bratislava, Slovak Republic, 20.10.2010. - Bratislava : RT Systems, 2010. - ISBN 978-80-970519-0-7. - CD-ROM
- Blaho, M. Foltin, M. (2009). Matlab (9) Database Toolbox. In: *AT&P Journal*. - ISSN 1335-2237. - Roč. 16, č. 1 (2009), s. 58-59
- Fodrek, P. Blaho, M. Foltin, M. Lichý, M. Murgaš, T. (2012) Linux Based Real-Time Control over Industrial Networks. In: *Handbook of Research on Industrial Informatics and*

*Manufacturing Intelligence: Innovations and Solutions*. - Hershey : IGI Global, 2012. - ISBN 978-1-4666-0296-0. - S. 334-371

Švančara, J. Kráľová, Z. Blaho, M. (2012) Optimization of HMLV Manufacturing Systems Using Genetic Algorithm and Simulation. In: *International Review on Modelling and Simulations*. - ISSN 1974-9821. - Vol. 5, No. 1 (2012), s. 482-487

Farkas, L. Blaho, M. Foltin, M. (2008) Bezdrôtové siete v priemysle. In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*. - ISSN 1335-2547. - Roč. 14, mimoriadne číslo (2008), s. 160-164

Murgaš, J. Foltin, M. Blaho, M. (2011) Budiace systémy elektrární na území Slovenskej republiky. In: *ATP Journal*. - ISSN 1335-2237. - Roč. 18, č. 7 (2011), s. 52-53

Poliačik, M. Murgaš, J. Farkas, L. Blaho, M. (2011) A Robust MRAC with Decomposed Adaptation Error in the Presence of Uncertainties. In: *Selected Topics in Modelling and Control. Vol. 7*. - Bratislava : Slovak University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-227-3597-1. - S. 73-78

Dorner, J. Blaho, M. (2011) Design and Control of an Automatized Stacker Crane for Warehouses. In: *Recent Advances in Manufacturing Engineering : 4th International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems*. Barcelona, Spain, September 15-17, 2011. - : WSEAS Press, 2011. - ISBN 978-1-61804-031-2. - S. 208-213

Farkas, L. Blaho, M. Hnát, J. (2008) Industrial Communication between Matlab and the Ethercat Fieldbus. In: *Technical Computing Prague 2008 : 16th Annual Conference Proceedings*. Prague, Czech Republic, 11.11.2008. - Praha : Humusoft s.r.o, 2008. - ISBN 978-80-7080-692-0. - CD-Rom

Fodrek, P. Foltin, M. Blaho, M. Farkas, L. Poliačik, M. (2009) RTAI in CAN Bus Based Network Control of CNC for Plasma Cutting. In: *Eleventh Real-Time Linux Workshop : Dresden, Germany, 28.-30.9.2009*. - Dresden : TU, 2009. - S. 79-88

Foltin, M. Fodrek, P. Blaho, M. Murgaš, J. (2011) Open Source Technologies in Education. In: *Recent Researches in Educational Technologies : Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Engineering Education (EDUCATION'11) and 2nd International Conference on Education and Educational Technologies (WORLD-EDU'11)*. Corfu Island, Greece, July 14-16, 2011. - : WSEAS Press, 2011. - ISBN 978-1-61804-021-3. - S. 131-135

Poliačik, M. Murgaš, J. Farkas, L. Blaho, M. (2010) A Robust MRAC Modification and Performance Improvement in the Presence of Uncertainties. In: *ALCOSP 2010 and PSYCO 2010. IFAC Workshop an Adaptation and Learning in Control and Signal Processing and IFAC Workshop on Periodic Control Systems : Antalya, Turkey, 26.-28.8.2010*. - : IFAC, 2010. - CD-Rom

Urban, M. Blaho, M. Murgaš, J. Foltin, M. (2011) Simulation of Networked Control Systems via Truetime. In: *Technical Computing Prague 2011 : 19th Annual Conference Proceedings*. Prague, Czech Republic, November 8, 2011. - Prague : Institute of Chemical Technology, 2011. - ISBN 978-80-7080-794-1. - CD-Rom

Valigura, K. Foltin, M. Blaho, M. (2009) Transport System Realization in SimEvents Tools. In: *Technical Computing Prague 2009 : 17th Annual Conference Proceedings*.



Prague, Czech Republic, 19.11.2009. - Prague : Humusoft, Ltd., 2009. - ISBN 978-80-7080-733-0. - CD-Rom

Jackuliak, L. Spielmann, R. Blaho, M. (2011) Ovládanie robota pomocou mobilného telefónu. In: *ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác.* Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2011. - ISBN 978-80-227-3508-7. - S. 367-372

Poliačik, M. Blaho, M. Chvostek, T. (2007) Control Issues in Networked Systems. In: *Process Control 2007 : 16th International Conference.* Štrbské Pleso, Slovak Republic, 11.-14.6.2007. - Bratislava : STU v Bratislave ChtF, 2007. - ISBN 978-80-227-2677-1. - CD-Rom

Murgaš, J. Murgaš, T. Fodrek, P. Farkas, L. Blaho, M. Poliačik, M. (2009) A Networked Control system for Industrial Applications. In: *Preprints of IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems PDES 2009 : Rožnov p. Radhoštem, Czech Republic, 10.-12.2.2009.* - Ostrava : Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - Technical University of Ostrava, 2009. - S. 236-239

Foltin, M. Blaho, M. Valigura, K. (2009) Modelovanie variabilného dopravného oneskorenia v sieťovej komunikácii. In: *SdĽovací technika.* - ISSN 0036-9942. - Roč. 57, č. 6 (2009), s. 12-13

Fodrek, P. Foltin, M. Blaho, M. (2010) História a princíp UNIX-u. 1. časť. (<http://www.posterus.sk/?p=5262>) In: *Posterus.* - ISSN 1338-0087. - Vol. 3, Iss. 1 (2010)

Fodrek, P. Foltin, M. Blaho, M. (2010) História a princíp UNIX-u. 2. časť. (<http://www.posterus.sk/?p=5617>) In: *Posterus.* - ISSN 1338-0087. - Vol. 3, Iss. 1 (2010)

Fodrek, P. Foltin, M. Blaho, M. (2010) História a princíp UNIX-u. 3. časť. (<http://www.posterus.sk/?p=5789>) In: *Posterus.* - ISSN 1338-0087. - Vol. 3, Iss. 2 (2010)

Fodrek, P. Foltin, M. Blaho, M. (2009) OSADL RTLWS 2009 - 1. časť. (<http://www.posterus.sk/?p=3291>) In: *Posterus.* - ISSN 1338-0087. - Vol. 2, Iss. 10 (2009), web-page

Fodrek, P. Foltin, M. Blaho, M. (2009) OSADL RTLWS 2009 - 2. časť. (<http://www.posterus.sk/?p=3381>) In: *Posterus.* - ISSN 1338-0087. - Vol. 2, Iss. 10 (2009), web-page

Foltin, M. Blaho, M. (2008) MATLAB (3) Control System Toolbox. In: *AT&P Journal.* - ISSN 1335-2237. - Roč. 15, č. 5 (2008), s. 97-98

Foltin, M. Blaho, M. (2008) MATLAB (5) Stateflow - modelovanie udalostných systémov. In: *AT&P Journal.* - ISSN 1335-2237. - Roč. 15, č. 7 (2008), s. 68-69

Foltin, M. Blaho, M. (2008) MATLAB (5) Virtual Reality Toolbox In: *AT&P Journal.* - ISSN 1335-2237. - Roč. 15, č. 8 (2008), s. 45-46

Murgaš, J. Fodrek, P. Blaho, M. Murgaš, T. (2010) Polohovanie plazmového rezacieho stroja. In: *AT&P Journal.* - ISSN 1335-2237. - Roč. 17, č. 9 (2010), s. 38-39

Fodrek, P. Foltin, M. Blaho, M. (2010) Zmeny vo výučbe Unixu na FEI STU od šk. roku 2010/2011. In: *Otvorený softvér vo vzdelávaní, výskume a v IT riešeniach : Zborník príspevkov medzinárodnej konferencie OSSConf 2010. Žilina, SR, 1.-4.7.2010.* - Bratislava

: Spoločnosť pre otvorené informačné technológie, 2010. - ISBN 978-80-970457-0-8. - S. 75-84

Foltin, M. Blaho, M. Fodrek, P. (2011) Otvorený formát textových dokumentov v kancelárii. In: *Otvorený softvér vo vzdelávaní, výskume a v IT riešeníach : Zborník príspevkov medzinárodnej konferencie OSSConf 2011. Žilina, SR, 6.-9.7.2011.* - Bratislava : Spoločnosť pre otvorené informačné technológie, 2011. - ISBN 978-80-970457-1-5. - S. 239-248

### **Použitá literatúra (okrem prác autora)**

Castillo, O. Melin, P. (2008). Type-2 fuzzy logic: theory and applications. vol. 223, 2008, Springer Verlag

Cervin, A. Henriksson, D. Ohlin, M. (2010a) TrueTime 2.0 beta 5 - Reference Manual, Department of Automatic Control, Lund University, Sweden, June 2010. cit: 31.8.2012, dostupné na <http://www3.control.lth.se/truetime/>

Cervin, A., Linconln, B. (2010b) Jitterbug 1.23 Reference Manual. Department of Automatic Control. Lund University. Sweden, June 2010. cit: 31.8.2012. dostupné na <http://www.control.lth.se/media/Research/Tools/Jitterbug/manual.pdf>

Dang, X.K. Guan, Z.H. Tran, H.D. Li, T. (2011) Fuzzy adaptive control of networked control system with unknown time-delay. In *Control Conference (CCC), 2011 30th Chinese.* s. 4622-4626, 2011, IEEE

Du, W. Du, F. (2009). Novel Smith Predictor and Fuzzy Control for Networked Control Systems. In *Asia-Pacific Conference on Information Processing, 2009. APCIP 2009.* vol. 1 s. 75-78. 2009. IEEE

Dong, C. Xu, L. Chen, Y. Wang, Q. (2009). Networked flexible spacecraft attitude maneuver based on adaptive fuzzy sliding mode control. *Acta Astronautica.* vol. 65. no. 11. s. 1561-1570. 2009. Elsevier

Eyermann. (2008). Simulating Networks with Network Simulator 2(ns2),. International Summer School on Network and Service Management, Euroean Commision, 2008, cit. 31.8.2012, dostupné na: <http://www.aims-conference.org/issnsm-2008/02-ns2.pdf>

Hua, C. Ding, S. Guan, XP (2012). Decentralized Networked Control System Design using TS Fuzzy Approach. In *IEEE Transactions on Fuzzy Systems.* no. 99 s.1. 2012. IEEE

INRIA Sophia Antipolis. (2011). NS-3,. INRIA, 2011. cit. 31.8.2012, dostupné na <http://www.nsnam.org/>

Liang, Q. Mendel, J.M. (2000). Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design. In *IEEE Transactions on Fuzzy Systems.* vol.8. no. 5 s. 535-550, 2000, IEEE

Mahmoud, M.S. Saif, A.W.A. (2012). Robust Quantized Approach to Fuzzy Networked Control Systems. In *Intelligent Control and Automation.* vol. 3. no. 1. s. 59-70. 2012. Scientific Research Publishing

Mendel, J.M. (2001). Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems. Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, NJ. 2001. ISBN 0-13-040969-3

Mouzouris, G.C. and Mendel, J.M. (1997). Nonsingleton fuzzy logic systems: Theory and application. In *IEEE Transactions on Fuzzy Systems.* vol.5. no. 1. s. 56-71, 1997

- Pohjola, M. , Nethi. S. (2009). PiccSIM Manual, Helsinki University of Technology, 2009 cit. 31.8.2012, dostupné na <http://autsys.tkk.fi/en/attach/Control/PiccSIM%20Manual.pdf>
- Siemens, AG. (2012a). Profinet - this is my way - Automation technology - Siemens[online]. Siemens. A.G.1996-2012. citované dňa 31.8.2012, dostupné na <http://www.siemens.com/profinet>
- Siemens, AG. (2012b). Industrial Wireless LAN-Industrial Communication - Siemens[online]. Siemens, A.G. . 1996-2012. citované dňa 31.8.2012. dostupne na <http://www.siemens.com/iwlan>
- Tipsuwan, Y. Chow, M.Y. (2003). Control methodologies in networked control systems. In *Control en gineering practice*. vol. 11. no. 10. s. 1099-1111. 2003. Elsevier
- Tian, X.Wang, X. Cheby, Y. (2007). A Self-tuning Fuzzy Controller for Networked Control System. In: *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol.7 no. 1/2007, s. 97-102
- Wang, L.X. (1994). Adaptive fuzzy systems and control- Design and stability analysis. Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice Hall, 1994
- Ying, H. (2008). General interval type-2 Mamdani fuzzy systems are universal approximators. In *Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, 2008. NAFIPS 2008*. s. 1-6. 19-22 May 2008
- Xu, L. Dong, C. Chen, Y. (2007) An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Networked Control Systems. In *International Conference on Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007*. s. 1190-1195. 2007. IEEE
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. In *Information and control*. vol. 8. no.3. s. 338-353. Elsevier. 1965
- Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. In *Information sciences*. vol.8. no. 3. s. 199-249, 1975 Elsevier