

Ing. Zuzana Dideková

Autoreferát dizertačnej práce

HYBRIDNÉ INTELIGENTNÉ METÓDY MODELOVANIA A RIADENIA

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Kybernetika

v študijnom odbore

9.2.7 kybernetika

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Zuzana Dideková

Autoreferát dizertačnej práce

HYBRIDNÉ INTELIGENTNÉ METÓDY MODELOVANIA A RIADENIA

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Kybernetika

Bratislava, 2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej a externej forme doktorandského štúdia na Ústave robotiky a kybernetiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Zuzana Dideková**
Regotrans - Rittmeyer, spol. s r.o.
Pluhová 2, 830 00 Bratislava 3

Školiteľ: **prof. Ing. Štefan Kozák, PhD.**
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **Ing. Ivana Budinská, PhD.**
Ústav informatiky SAV
Dúbravská cesta 9, 845 07 Bratislava 45

prof. Ing. Juraj Spalek, PhD.
Katedra riadiacich a informačných systémov
Elektrotechnická fakulta Žilinskej univerzity v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod.
na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU v Bratislave

Abstrakt

Cieľom dizertačnej práce je návrh hybridných inteligentných metód riadenia nelineárnych dynamických systémov s využitím metód výpočtovej techniky, ktoré sú založené na fuzzy, neuro, neuro-fuzzy a genetických prístupoch a metódach. V dizertačnej práci je uvedený prehľad súčasného stavu využívania metód výpočtovej inteligencie v modelovaní a riadení vo svete. Hlavná časť dizertačnej práce je venovaná návrhu nového prístupu riadenia nelineárnych systémov s viacerými vstupmi, v ktorom je využitý hybridný prístup s použitím fuzzy logiky a genetických algoritmov. Adaptívne hybridné riadenie s prepínaním využíva princíp adaptácie parametrov riadenia pre všetky pracovné body nelineárneho systému. Riadenie systému je realizované fuzzy regulátorom a optimalizácia jeho parametrov pre jednotlivé pracovné body využíva genetický algoritmus. Teoretická časť návrhu je aplikovaná do programového systému realizovaného v programovom prostredí Matlab-Simulink. Pre ozrejmienie metodiky hybridného inteligentného riadenia boli testované rôzne príklady, z nich jeden je detailne analyzovaný v dizertačnej práci. Adaptívne hybridné riadenie s prepínaním je nová inovatívna metóda riadenia, ktorá umožňuje riadenie nelineárnych MISO (multi input single output) systémov s vysokou kvalitou riadenia. Výsledky dizertačnej práce sa dajú využiť v riadení nelineárnych systémov v priemyselnej oblasti (robotika, mechatronika, chemicko - technologické procesy, biotechnológie a pod.).

Kľúčové slová: hybridné inteligentné metódy, fuzzy PID regulátor, genetický algoritmus, adaptácia

Obsah

ABSTRAKT	3
OBSAH	4
1 ÚVOD	5
2 FORMULÁCIA ÚLOH MODELOVANIA A RIADENIA	5
3 SÚČASNÝ STAV VYUŽÍVANIA METÓD VÝPOČTOVEJ INTELIGENCIE V MODELOVANÍ A RIADENÍ	7
3.1 FUZZY SYSTÉMY V MODELOVANÍ A RIADENÍ	7
3.2 GENETICKÉ ALGORITMY V MODELOVANÍ A RIADENÍ	8
3.3 UMELÉ NEURÓNNOVÉ SIETE V MODELOVANÍ A RIADENÍ	9
3.4 HYBRIDNÉ INTELIGENTNÉ VÝPOČTOVÉ TECHNIKY V MODELOVANÍ A RIADENÍ.....	10
4 ADAPTÍVNE HYBRIDNÉ RIADENIE S PREPÍNANÍM	11
5 PROGRAMOVÝ SYSTÉM AKO MODULÁRNY INTERAKTÍVNY SYSTÉM	19
5.1 GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE PROGRAMOVÉHO SYSTÉMU	19
5.2 OPIS PROGRAMOVÉHO SYSTÉMU	19
6 PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA: MODIFIKOVANÝ JEDNOSMERNÝ MOTOR	25
6.1 OPIS PROCESU	25
6.2 NÁVRH RIADENIA.....	29
6.2.1 <i>Rozmiestnenie pracovných bodov</i>	29
6.2.2 <i>Výpočet parametrov fuzzy PID regulátora</i>	29
6.2.3 <i>Parametre fuzzy PID regulátora a informácie o výpočte</i>	30
6.2.4 <i>Vyhodnotenie riadenia</i>	33
7 ZÁVER	38
POUŽITÁ LITERATÚRA	39
PUBLIKÁCIE AUTORA	43

1 Úvod

Vývoj metód automatického riadenia prešiel dlhodobým vývojom od konvenčných metód až po moderné metódy riadenia majúce vlastnosti robustnosti, adaptivity a inteligencie.

V priemyselnej praxi sa v súčasnosti aplikuje rad tradičných metód riadenia založených na PID algoritmoch (86%), stavových regulátoroch (5%), ako aj nových metód a algoritmov riadenia s prvkami optimality, predikcie, robustnosti, adaptivity a umelej inteligencie. Tieto nové metódy využívajú najnovšie poznatky numerickej matematiky, informatiky a teórie automatického riadenia.

Je veľmi dobre známe, že veľká väčšina spätnoväzobných systémov riadenia môže byť uspokojivo riadená pomocou jednoduchých lineárnych regulátorov typu P/PI/PID. V priemyselnej praxi sú často tieto regulátory nastavované graficko-analytickými metódami, alebo priamo technickými pracovníkmi alebo technológmi dobre ovládajúcimi dynamické pochody v riadených procesoch.

Rozvoj moderných metód riadenia patriacich do skupiny tzv. soft techník umožnil ďalšie skvalitnenie riadiacich algoritmov spojitych procesov. Jedným z možných spôsobov je napr. návrh a aplikácia algoritmov realizovaných na báze fuzzy logiky (FL), umelých neurónových sietí (UNS) a genetických algoritmov (GA). Tieto inteligentné algoritmy riadenia využívajú pre svoj návrh expertné analýzy alebo namerané vstupno-výstupné dáta a sú často jednoduchšie a s lepšou kvalitou riadenia, ako v prípade algoritmov riadenia, ktoré využívajú pri svojom návrhu opis procesu diferenciálnymi, resp. diferenčnými rovnicami. (Kozák 2011, Kozák 2009)

Hybridné inteligentné systémy (HIS; fuzzy-neuro, fuzzy-genetic, neuro-genetic a pod.) sú ďalším vhodným kandidátom pre aplikáciu metód výpočtovej inteligencie. Spájajú výhody jednotlivých inteligentných výpočtových metód a snažia sa eliminovať ich nevýhody. Aplikácie počítačových systémov na báze kombinovaných hybridných metód riadenia môžu signifikantne zlepšiť kvalitu, spoľahlivosť a bezpečnosť prevádzok, systémov a zariadení. (Kozák 2010, Kozák 2011)

Cieľom dizertčnej práce je návrh efektívnej hybridnej inteligentnej metódy, ktorá je kombináciou metód výpočtovej inteligencie a využíva princíp adaptácie parametrov riadenia pre všetky pracovné body nelineárneho systému. Za účelom simulácie a modelovania je vytvorený všeobecný podporný systém v prostredí Matlab – Simulink umožňujúci testovať a navhovať efektívne hybridné metódy riadenia pre široké spektrum nelineárnych procesov. Pre ozrejmienie metodiky hybridného inteligentného riadenia boli testované rôzne príklady, z nich jeden je detailne analyzovaný v dizertačnej práci.

2 Formulácia úloh modelovania a riadenia

Modelovanie a riadenie systémov spočíva vo vyriešení problému návrhu takého modelu, regulátora alebo iného riadiaceho člena, ktorý by vnútil systému požadované správanie.

V modelovaní dynamických systémov sa a za týmto účelom využívajú rôzne optimalizačné integrálne alebo sumačné kritériá kvality modelovania. Najčastejšie ide o minimalizáciu jedného z týchto kritérií:

integrál (IAE) alebo suma (SAE) absolútnych hodnôt odchýlok

$$\text{IAE: } J(\bar{x}) = \int_0^T |e(t, \bar{x})| dt = \int_0^T |y(t) - y'(t, \bar{x})| dt, \quad (2.1)$$

$$\text{SAE: } J(\bar{x}) = \sum_{i=0}^{N-1} |e(i, \bar{x})| = \sum_{i=0}^{N-1} |y(i) - y'(i, \bar{x})|, \quad (2.2)$$

integrál (ISE) alebo suma (SSE) štvorcov odchýlok

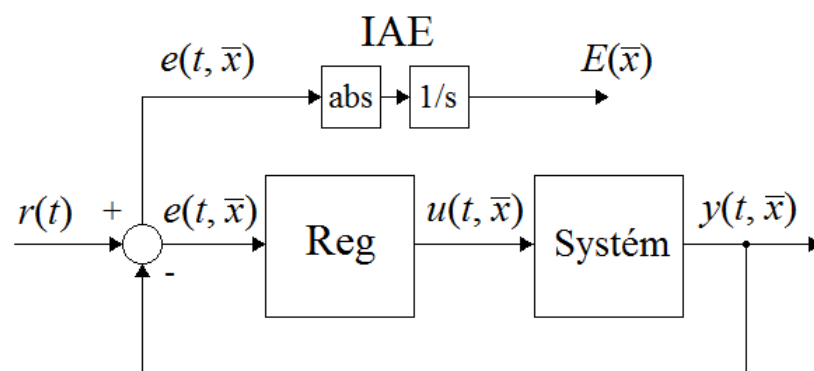
$$\text{ISE: } J(\bar{x}) = \int_0^T e(t, \bar{x})^2 dt = \int_0^T (y(t) - y'(t, \bar{x}))^2 dt, \quad (2.3)$$

$$\text{SSE: } J(\bar{x}) = \sum_{i=0}^{N-1} e(i, \bar{x})^2 = \sum_{i=0}^{N-1} (y(i) - y'(i, \bar{x}))^2, \quad (2.4)$$

kde J je kritériálna funkcia, y je výstup z modelovaného systému, y' je výstup z modelu, e je odchýlka medzi výstupom z modelovaného systému a modelu, \bar{x} je vektor parametrov modelu, T je sledovaná doba, N je počet vzoriek počas sledovanej doby a t je spojité a k diskrétny čas.

Integrálne kritériá sa používajú v spojitých a sumačné kritériá v diskretných systémoch. Najbežnejšie používané sú kritériá ISE a SSE, pretože sú vhodné aj pre analytické metódy návrhov modelov. Tieto kritériá navyše prikladajú dôraz na väčšie odchýlky zanedbávajú menšie. Kritériá IAE a SAE nie sú veľmi vhodné pre analytický návrh modelov, ale sú presnejšie.

V riadení sa používajú obnemené vyššie spomenuté kritériá kvality (2.1) – (2.4), kde namiesto y je referenčná premenná r a namiesto y' je riadená výstupná veličina y , e je regulačná odchýlka a \bar{x} je vektor parametrov regulátora.



Obr. 2.1 Schéma zapojenia uzavretého regulačného obvodu pri výpočte hodnoty kritériálnej funkcie IAE

V riadení sú dôležité ďalšie kritériá riadenia ako napr. doba regulácie T_{reg} , trvalá regulačná odchýlka $e(\infty)$, veľkosť preregulovania η_{reg} , ... Tieto kritériá sa zvyknú posudzovať samostatne alebo sa môže kritériálna funkcia o ne rozšíriť. Napríklad:

$$J(\bar{x}) = E(\bar{x}) + \alpha T_{reg}(\bar{x}) + \beta \eta_{reg}(\bar{x}) \quad (2.5)$$

Koeficienty α a β sú kladné reálne čísla a vyjadrujú dôležitosť trvalej regulačnej odchýlky T_{reg} a veľkosti preregulovania η_{reg} v riadení. Čím sú tieto koeficienty väčšie, tým menšie hodnoty T_{reg} a η_{reg} je potrebné dosiahnuť.

Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je návrh hybridných inteligentných metód riadenia nelineárnych dynamických systémov s využitím metód výpočtovej techniky, ktoré sú založené na fuzzy, neuro, neuro-fuzzy a genetických prístupoch a metódach.

Z obsahového hľadiska je dizertačná práca zameraná na riešenie nasledovných úloh:

1. Návrh inteligentných neuro, fuzzy alebo neuro-fuzzy regulátorov pre nelineárne dynamické systémy pomocou genetických algoritmov.
2. Aplikácia a testovanie navrhnutých hybridných inteligentných prístupov modelovania a riadenia nelineárnych dynamických systémov na fyzikálnych modeloch procesov.
3. Vytvorenie univerzálneho a unikátneho programového systému, umožňujúceho modelovať a riadiť zložité nelineárne procesy pomocou užívateľského prostredia vytvoreného v systéme Matlab-Simulink.

3 Súčasný stav využívania metód výpočtovej inteligencie v modelovaní a riadení

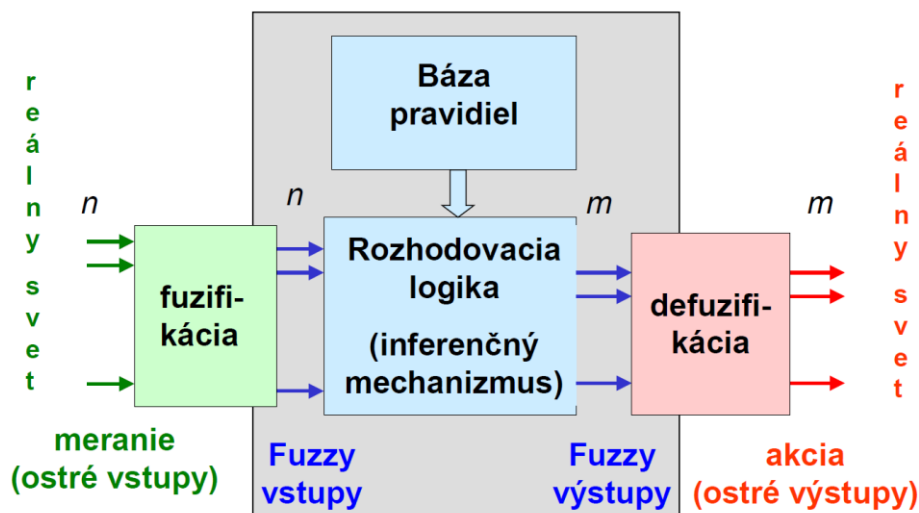
3.1 Fuzzy systémy v modelovaní a riadení

V roku 1965 publikoval L. A. Zadeh článok, ktorým začal mohutný rozvoj modifikovanej teórie množín, tzv. teórie fuzzy množín. Je to prostriedok, ktorý umožňuje matematicky opísať vágne pojmy a pracovať s nimi. (Novák 1986) Teória fuzzy množín patrí medzi najlepšie matematicky spracované časti umelej inteligencie, pomocou ktorej môžeme modelovať, simulovať a riadiť veľkú časť procesov ľudského uvažovania.

Navrhnuť inteligentný systém modelovania a riadenia na báze fuzzy logiky znamená vytvoriť model správania sa systému pomocou rozhodovacích pravidiel vyjadrujúcich cieľavedomé a kauzálne správanie sa skúmaného procesu, získaných na základe skúseností experta alebo na základe meraných údajov.

Pri klasických fuzzy modeloch je výber funkcií príslušnosti ľubovoľný a báza pravidiel vytvorená na základe istých expertných skúseností užívateľa. Funkcia príslušnosti závisí od jej parametrov a zmenou týchto parametrov meníme aj tvar funkcie príslušnosti, a tým aj vlastnosti celého fuzzy modelu. V prípade, ak máme súbor nameraných vstupných

a výstupných dát procesu (systému) a chceme ho namodelovať, nie je nevyhnutné vopred poznať a nastaviť štruktúru fuzzy modelu, ale pomocou adaptívneho systému (ANFIS) môžeme navrhnuť taký fuzzy inferenčný systém, ktorého parametre funkcií príslušnosti sa budú ladiť, napr. pomocou metódy spätného šírenia chýb (back-propagation) a metódou najmenších štvorcov tak, aby daný fuzzy model mal optimálne modelovacie a riadiace vlastnosti. (Kozák 2009)



Obr. 3.1 Všeobecná schéma fuzzy systému pre modelovanie a riadenie (Sekaj 2006)

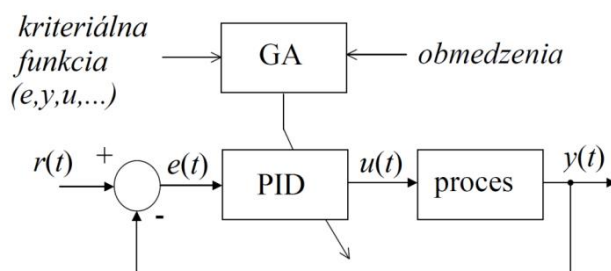
3.2 Genetické algoritmy v modelovaní a riadení

Genetické algoritmy v riadení

Genetické algoritmy sa v riadení používajú na optimalizáciu parametrov regulačného obvodu. Najčastejšie na optimalizáciu parametrov regulátora, napr. PID regulátora, fuzzy regulátora alebo neurónového regulátora alebo na on-line identifikáciu parametrov riadeného systému, ktorý je následne riadený niektorým z adaptívnych algoritmov.

Návrh regulátora pomocou genetického algoritmu

Parametre niektorého typu regulátora (napr. PID regulátor, neurónový regulátor, fuzzy regulátor, ...) sa navrhnu pomocou genetického algoritmu.



Obr.3.2 Regulačný obvod s PID regulátorom navrhnutým pomocou genetického algoritmu

Príklad návrhu PID regulátora

PID regulátor:

$$u(t) = P \cdot e(t) + I \cdot \int e(t) dt + D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Reťazec: $\bar{x} = [P, I, D]$

Chromozómom je tu postupnosť parametrov regulátora (napr. parametre P , I a D pre PID regulátor) a ako fitness slúži niektoré integračné alebo sumačné kritérium kvality (napr. IAE alebo SAE), ktoré sa minimalizuje.

3.3 Umelé neurónové siete v modelovaní a riadení

Umelé neurónové siete napodobňujú reprezentáciu „netransparentných“ znalostí a schopností mozgu, ktoré nevieme vyjadriť slovne, ale vieme ich využívať a akumulujú informácie, znalosti a schopnosti získané tréningom. Sú schopné napodobňovať (modelovať) nelineárne závislosti, správanie sa, rozhodovanie, rozpoznávanie ... Majú schopnosť učiť sa/adaptovať, odolnosť voči poruchám, schopnosť zovšeobecňovať ... (Sekaj 2006)

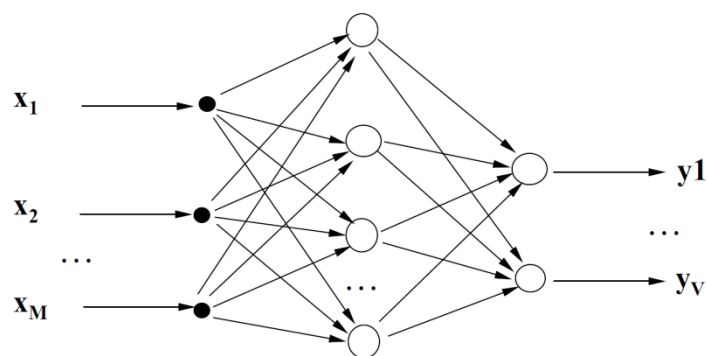
Používajú sa na modelovanie a predikciu správania sa, prípadne riadenie zložitých systémov. Inteligentné systémy riadenia založené na metódach umelých neurónových sietí predstavujú výrazný prínos do kvality riadenia. Paralelná architektúra umelých neurónových sietí (UNS) umožňuje vykonávať výpočty pre ovládanie činnosti zariadení vysokými rýchlosťami. Pretože UNS môžu aproximovať chovanie nelineárnych systémov s vysokou presnosťou, ako aj vzhľadom na svoju univerzálnosť, sa umelé neurónové siete javia ako veľmi silný nástroj pre návrh inteligentných algoritmov riadenia.

Najpoužívanejším typom umelej neurónovej siete pre modelovanie a riadenie je viacvrstváva perceptrónová sieť (multi layer perceptron, MLP). Obsahuje vstupnú a výstupnú vrstvu a aspoň jednu skrytú vrstvu neurónov. Väčšinou obsahuje spojitú nelineárne aktivačnú funkciu (obvyčajne sigmoidu alebo hyperbolický tangens). Je schopná aproximovať ľubovoľnú nelineárnu transformáciu. Parametrizácia takejto siete sa realizuje tréňovaním umelej neurónovej siete algoritmom "spätneho šírenia chyby" (back-propagation). Všeobecná schéma viacvrstvej perceptrónovej siete je na obrázku Obr.3.32.

Výstupom z jedného neurónu (perceptrónu) UNS je výstup aktivačnej funkcie neurónu, ktorej vstupom bola suma váhovaných vstupov neurónu a zápornej hodnoty prahu neurónu:

$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^n (w_i x_i) - \phi \right) = \varphi(a), \quad (3.2)$$

kde x_i sú vstupy neurónu, w_i sú váhy synaptických spojení, θ je prah (citlivosti) neurónu, a je vnútorná aktivita neurónu, φ je aktivačná funkcia neurónu, y je výstup neurónu a n je počet vstupov neurónu.



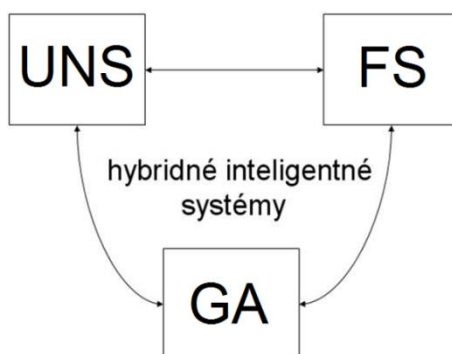
Obr.3.3 Všeobecná schéma viacvrstvovej perceptrónovej siete (multi layer perceptron)

3.4 Hybridné inteligentné výpočtové techniky v modelovaní a riadení

Hybridný inteligentný systém v sebe kombinuje aspoň dve inteligentné technológie. Každá z týchto technológií má svoje silné, ale aj slabé stránky. Fuzzy logika je dobrá pri nepresnostiach, umelé neurónové siete sa dokážu učiť a evolučné výpočtové techniky sú vhodné na optimalizáciu. Tabuľka 3.2 porovnáva rôzne inteligentné technológie. Dobrý hybridný systém spája v sebe ich výhody (Negnevitsky 2005). Bloková schéma hybridných inteligentných systémov je zobrazená na Obr.3.4.

Tabuľka 3.1 Porovnanie inteligentných technológií: fuzzy systémov (FS), umelých neurónových sietí (UNS) a genetických algoritmov (GA) (Negnevitsky 2005)

	FS	UNS	GA
reprezentácia znalostí	výborná	veľmi zlá	zlá
tolerancia nestálosti	výborná	výborná	výborná
tolerancia nepresnosti	výborná	výborná	výborná
adaptabilnosť	zlá	výborná	výborná
schopnosť učenia	veľmi zlá	výborná	výborná
schopnosť vysvetlenia	výborná	veľmi zlá	zlá
získovanie znalostí a dolovanie údajov	zlé	výborné	dobré
udržovateľnosť	dobrá	výborná	dobrá

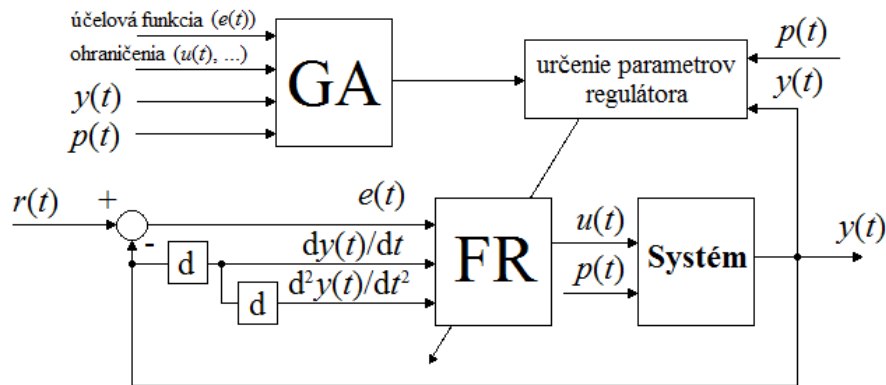


Obr.3.4 Bloková schéma hybridných inteligentných systémov

4 Adaptívne hybridné riadenie s prepínaním

V tejto časti dizertačnej práce je navrhnutá nová efektívna metóda riadenia nelineárnych systémov s viacerými vstupmi, kde jeden vstup slúži ako adaptívny parameter riadenia $p(t)$. Hodnoty parametrov fuzzy regulátora sa menia v závislosti od adaptívneho parametra riadenia $p(t)$ a výstupnej regulovanej veličiny $y(t)$ (Obr.4.1).

Pracovný priestor (p, y) je rozdelený na väčšie množstvo pracovných bodov (okolo 50 alebo 100), ktoré môžu byť rozmiestnené rovnomerne alebo sú hustejšie sústredené okolo nelinearít. Pre každý pracovný bod sú pomocou genetického algoritmu navrhnuté hodnoty parametrov fuzzy regulátora. V riadení sa potom parametre fuzzy regulátora prepínajú na základe najmenšej euklidovskej vzdialenosti medzi aktuálnou polohou systému v pracovnom priestore (p, y) a danými pracovnými bodmi.



Obr.4.1 Schéma adaptívneho hybridného riadenia s prepínaním

Fuzzy regulátor

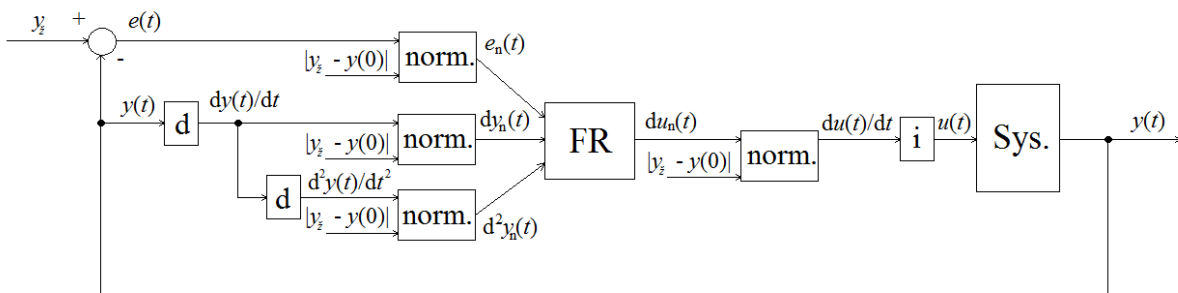
Ako fuzzy regulátor môže byť použitý niektorý zo známych typov fuzzy regulátora, alebo sa môže navrhnuť nový typ, s inými vstupmi a výstupmi fuzzy regulátora.

Ďalej uvažujme, že je použitý rýchlostný fuzzy PID regulátor s 3-D bázou pravidiel, kde I zložka je realizovaná pomocou regulačnej odchýlky $e(t)$, P zložka pomocou prvej derivácie výstupnej veličiny $dy(t)/dt$ a D zložka pomocou druhej derivácie výstupnej veličiny $d^2y(t)/dt^2$.

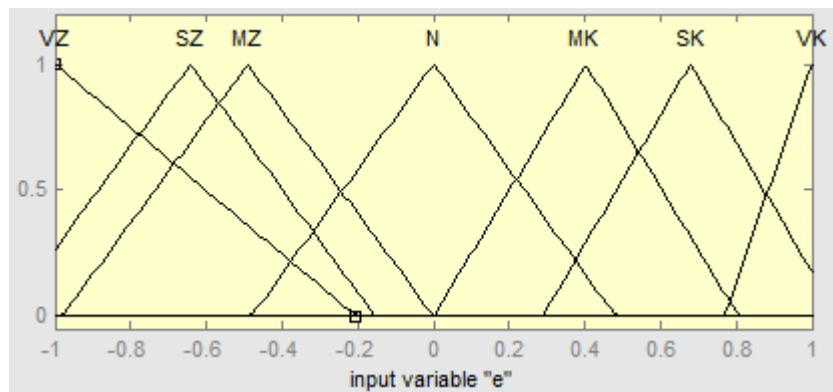
Výstupom z takéhoto fuzzy systému je derivácia akčného zásahu $du(t)/dt$. Vstupy a výstup fuzzy systému sú normované podľa veľkosti skokovej zmeny želanej hodnoty tak, aby boli v rozsahu $\langle -1; 1 \rangle$. Toto normovanie by malo zaručiť využitie celého rozsahu fuzzy systému pri akejkoľvek veľkosti skokovej zmeny želanej hodnoty. Schéma tohto zapojenia je zobrazená na obrázku Obr.4.2

Uvažujme, že fuzzy inferenčný systém je typu Mamdani a každá vstupná a výstupná fuzzy premenná má 7 funkcií príslušnosti (veľká kladná VK, stredná kladná SK, malá kladná MK, nulová N, malá záporná MZ, stredná záporná SZ a veľká záporná VZ). Pre zjednodušenie uvažujme, že majú tvar rovnoramenného trojuholníka. Príklad rozloženia funkcií príslušnosti

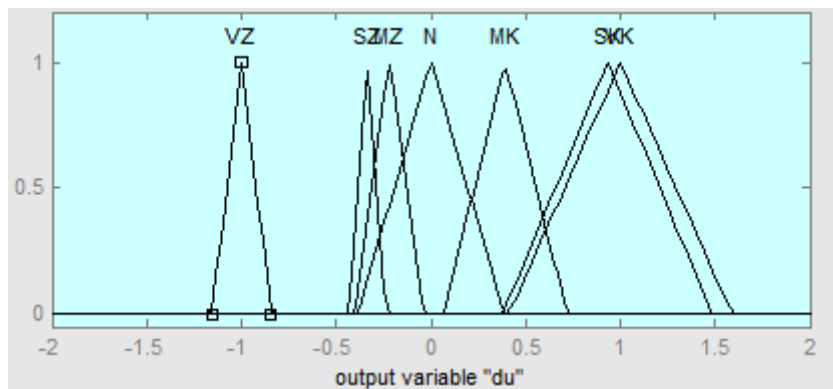
fuzzy vstupnej premennej je na obrázku Obr.4.3 a výstupnej fuzzy premennej na obrázku Obr.4.4.



Obr.4.2 Schéma riadenia systému s rýchlostným fuzzy PID regulátorom s 3-D bázou pravidiel a normovaním, kde $e_n(t)$, $dy_n(t)$, $d^2y_n(t)$ a $du_n(t)$ predstavujú normované premenné $e(t)$, $dy(t)/dt$, $d^2y(t)/dt^2$ a $du(t)/dt$



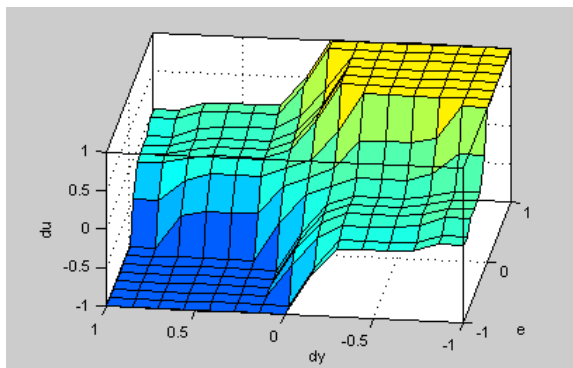
Obr.4.3 Príklad rozloženia funkcií príslušnosti vstupnej fuzzy premennej ($e = e(t)$)



Obr.4.4 Príklad rozloženia funkcií príslušnosti výstupnej fuzzy premennej ($du = du(t)/dt$)

Báza pravidiel môže byť vopred známa alebo sa určuje spolu s parametrami funkcií príslušnosti. Uvažujme vopred známu bázu pravidiel, ktorá je kvázi-lineárna a v ktorej sú uplatnené známe pravidlá riadenia s fuzzy PID regulátorom, ako napr.: „Ak je regulačná odchýlka veľká, zmena akčného zásahu je veľká.“ a „Ak regulačná odchýlka je nulová a aj zmena regulačnej odchýlky (výstupnej veličiny) je nulová, zmena akčného zásahu je tiež nulová.“. Báza pravidiel obsahuje v takomto prípade 343 pravidiel, pre každú kombináciu $e(t)$, $dy(t)/dt$ a $d^2y(t)/dt^2$ jedno. Pravidlá sú graficky znázornené na obrázku Obr.4.5.

Nech je na defuzzifikáciu použitá rozšírená ťažisková metóda.



Obr.4.5 Závislosť derivácie akčného zásahu $du(t)/dt$ (du) od regulačnej odchýlky $e(t)$ (e) a derivácie výstupnej veličiny $dy(t)/dt$ (dy)

Neznámymi parametrami fuzzy PID regulátora, ktoré treba určiť, sú v tomto prípade stredy a šírky funkcií príslušnosti. Konkrétne v prípade vstupov sú to šírky funkcií príslušnosti N, VK a VZ. Ich stredy sú známe: 0 pre N, 1 pre VK a -1 pre VZ. Ďalej stred a šírka SK a SZ a šírka MK a MZ. Poloha stredov MK a MZ závisí od ich širok, keďže začiatkový bod MK a koncový bod MZ musí ležať v bode 0. Pre výstupnú premennú je to 11 neznámych parametrov: šírka N, VK a VZ, a šírky a stredy MK, MZ, SK a SZ. Stredy N, VK a VZ sú také isté ako v prípade vstupov: 0, 1 a -1. Dostávame tak celkovo 38 neznámych parametrov.

Pre zjednodušenie uvažujme, že hľadanými parametrami sú v prípade vstupov polovica šírky N $u1n$ pre prvý vstup $e(t)$, $u2n$ pre druhý vstup $dy(t)/dt$ a $u3n$ pre tretí vstup $d^2y(t)/dt^2$, ďalej šírka MK ($u1mk, u2mk, u3mk$) a MZ ($u1mz, u2mz, u3mz$), polovica šírky VK ($u1vk, u2vk, u3vk$) a VZ ($u1vz, u2vz, u3vz$), stred SK ($u1sks, u2sks, u3sks$) a SZ ($u1szs, u2szs, u3szs$) a polovica šírky SK ($u1skr, u2skr, u3skr$) a SZ ($u1sizr, u2sizr, u3sizr$). Pre výstup to sú parametre: polovica šírky N (yn), VK (yvk) a VZ (yvz), stred MK ($ymks$) a MZ ($ymzs$) a polovica šírky MK ($ymkr$) a MZ ($ymzr$) a stred SK ($ysks$) a SZ ($yszs$) a polovica šírky SK ($yskr$) a SZ ($yszr$).

Normovanie vstupov a výstupu fuzzy regulátora

Aby sme získali na vstupe do fuzzy PID regulátora fuzzy premenné v rozsahu $<-1;1>$ a na výstupe výstupnú veličinu v požadovanom rozsahu, použijeme normovanie. Vstupné veličiny normujeme tak, aby boli v rozsahu fuzzy premenných $<-1;1>$:

$$e_n(t) = e(t)/|e(0)| \quad (4.1)$$

$$dy_n(t)/dt = gain_1 * dy(t)/dt / |e(t)| \quad (4.2)$$

$$d^2y_n(t)/dt^2 = gain_2 * d^2y(t)/dt^2 / |e(0)|, \quad (4.3)$$

kde $e_n(t)$, $dy_n(t)/dt$ a $d^2y_n(t)/dt^2$ sú normované hodnoty $e(t)$, $dy(t)/dt$ a $d^2y(t)/dt^2$ a $e(0)$ je počiatočná hodnota regulačnej odchýlky pri danej skokovej zmene referenčnej hodnoty. Parametre $gain_1$ a $gain_2$ sú parametre normovania.

Podobne výstupnú veličinu sa získa z normovaného výstupu fuzzy systému:

$$du(t)/dt = gain_3 * du_n(t)/dt * |e(0)|, \quad (4.4)$$

kde $du_n(t)/dt$ je normovaná hodnota $du(t)/dt$ a $gain_3$ je parameter normovania.

Parametre normovania $gain_1$, $gain_2$, $gain_3$ sa nastavujú na určité hodnoty tak, aby zabezpečili fuzzy riadenie v celom rozsahu fuzzy premenných pre všetky pracovné body naraz. Môžu sa tiež navrhovať samostatne, spolu s parametrami fuzzy systému, pre každý zvolený pracovný bod zvlášť. V tomto prípade je použitá iba jedna hodnota $gain_1$, $gain_2$ a $gain_3$, rovnaká pre všetky pracovné body, a experimentálna metóda na ich nájdenie.

Genetický algoritmus

Pomocou genetického algoritmu sú navrhnuté hodnoty parametrov fuzzy PID regulátora pre jednotlivé pracovné body (p , y).

Chromozómom (reťazcom) \bar{x} je súbor hľadaných parametrov fuzzy PID regulátora:

$\bar{x} = \{u1n, u1mk, u1vk, u1sks, u1skr, u1mz, u1vz, u1szs, u1szr, u2n, u2mk, u2vk, u2sks, u2skr, u2mz, u2vz, u2szs, u2szr, u3n, u3mk, u3vk, u3sks, u3skr, u3mz, u3vz, u3szs, u3szr, yn, yvk, ymks, ymkr, ysk, yskr, yvz, ymzs, ymzr, yszs, yszr\}$.

Génami reťazca sú gény fuzzy premenných (fuzzy vstupnej premennej e , dy a d^2y a fuzzy výstupnej premennej du), gény funkcií príslušnosti a gény jednotlivých parametrov fuzzy PID regulátora. Gény jednotlivých parametrov fuzzy PID regulátora sú najmenšími génmi a sú kódované reálnymi číslami v rozsahu (0; 1), okrem parametrov $u1n$, $u1mk$, $u1mz$, $u2n$, $u2mk$, $u2mz$, $u3n$, $u3mk$, $u3mz$ a yn , ktoré sú kódované v rozsahu (0; 2). Pri generovaní populácie, krížení a mutáciách treba tiež zohľadniť pravidlá návrhu fuzzy systémov.

Pre vstupné premenné musí platiť:

1. MK neskončí skôr ako MZ nezačne neskôr ako N.
2. SK nezačne skôr ako MK a SZ neskončí neskôr ako MZ.
3. SK sa prekrýva s MK a SZ sa prekrýva s MZ.
4. SK neskončí skôr ako MK a SZ nezačne neskôr ako MZ.
5. VK nezačne skôr ako SK a VZ neskončí neskôr ako SZ.
6. SK sa prekrýva s VK a SZ sa prekrýva s VZ.
7. VK neskončí skôr ako SK a VZ nezačne neskôr ako SZ.

Pre výstupnú premennú musí platiť:

1. MK neskončí skôr ako MZ nezačne neskôr ako N.
2. SK nezačne skôr ako MK a SZ neskončí neskôr ako MZ.
3. SK neskončí skôr ako MK a SZ nezačne neskôr ako MZ.
4. VK nezačne skôr ako SK a VZ neskončí neskôr ako SZ.
5. VK neskončí skôr ako SK a VZ nezačne neskôr ako SZ.

Na začiatku genetického algoritmu je vygenerovaná počiatočná populácia, so zvoleným počtom jedincov v populácii. Ďalej sa zvolený počet generácií opakuje vyhodnotenie jedincov, výber jedincov do pracovnej skupiny, kríženie, mutácia a výber jedincov do novej generácie. Najlepší jedinec z poslednej generácie je hľadaným súborom hodnôt parametrov fuzzy PID regulátora.

Vyhodnotenie jedincov

Vykoná sa simulácia regulačného obvodu s fuzzy PID regulátorom, kde hodnoty parametrov fuzzy regulátora sú určené na základe daného reťazca z populácie, pričom sa sleduje odozva systému na skokové zmeny želanej hodnoty smerom nahor a nadol v okolí pracovného bodu. Nech účelovou funkciou $J(\bar{x})$ je súčet integrálov alebo súm absolútnych hodnôt regulačnej odchýlky (IAE, SAE) pri skokovej zmene želanej hodnoty smerom nahor $J_h(\bar{x})$ a nadol $J_d(\bar{x})$. Fitness funkcia $F(\bar{x})$ predstavuje túto účelovú funkciu rozšírenú o funkcie ohraničení $O_h(\bar{x})$ v prípade skokových zmien želanej hodnoty smerom nahor a $O_d(\bar{x})$ smerom nadol, ktoré ju môžu ohraničovať vzhľadom na rôzne premenné. V tejto práci je účelová funkcia ohraničená vzhľadom na veľkosť výstupu, zmenu veľkosti výstupu (tlmenie kmitania), veľkosť akčného zásahu, zmenu veľkosti akčného zásahu, veľkosť prekročenia zmeny akčného zásahu, preregulovanie η_{reg} , veľkosť prekročenia povoleného preregulovania, dobu regulácie T_{reg} , trvalú regulačnú odchýlku $e(\infty)$ a veľkosť prekročenia povolenej trvalej regulačnej odchýlky.

Účelová funkcia:

$$J(\bar{x}) = J_h(\bar{x}) + J_d(\bar{x}) , \quad (4.5)$$

kde

$$J_i(\bar{x}) = \int_{t=0}^T |e(t, \bar{x})| dt \quad (4.6)$$

Fitness funkcia:

$$F(\bar{x}) = J(\bar{x}) + O_h(\bar{x}) + O_d(\bar{x}) \quad (4.7)$$

Funkcia ohraničení:

$$O_i(\bar{x}) = c_1 o_{1i}(\bar{x}) + c_2 o_{2i}(\bar{x}) + c_3 o_{3i}(\bar{x}) + c_4 o_{4i}(\bar{x}) + c_5 o_{5i}(\bar{x}) + c_6 o_{6i}(\bar{x}) + c_7 o_{7i}(\bar{x}) + c_8 o_{8i}(\bar{x}) + c_9 o_{9i}(\bar{x}) + c_{10} o_{10i}(\bar{x}) \quad (4.8)$$

Ohraničenie veľkosti výstupu:

$$o_{1i}(\bar{x}) = \int_{t=0}^T (o_{1vi}(t, \bar{x}) + o_{1si}(t, \bar{x})) dt \quad (4.9)$$

$$o_{1vi}(t, \bar{x}) = \begin{cases} y_i(t, \bar{x}) - d_{1v} & \text{ak } y_i(t, \bar{x}) > d_{1v} \\ = 0 & \text{inak} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$o_{1si}(t, \bar{x}) = \begin{cases} d_{1s} - y_i(t, \bar{x}) & \text{ak } y_i(t, \bar{x}) < d_{1s} \\ = 0 & \text{inak} \end{cases} \quad (4.11)$$

Ohraničenie zmeny veľkosti výstupu (tlmenie kmitania):

$$o_{2i}(\bar{x}) = \int_{t=0}^T |dy_i(t, \bar{x}) / dt| dt \quad (4.12)$$

Ohraničenie veľkosti akčného zásahu:

$$o_{3i}(\bar{x}) = \int_{t=0}^T (o_{3vi}(t, \bar{x}) + o_{3si}(t, \bar{x})) dt \quad (4.13)$$

$$o_{3vi}(t, \bar{x}) = \begin{cases} u_i(t, \bar{x}) - d_{3v} & \text{ak } u_i(t, \bar{x}) > d_{3v} \\ = 0 & \text{inak} \end{cases} \quad (4.14)$$

$$o_{3si}(t, \bar{x}) = d_{3s} - u_i(t, \bar{x}) \quad \text{ak } u_i(t, \bar{x}) < d_{3s} \\ = 0 \quad \text{inak} \quad (4.15)$$

Ohraničenie zmeny veľkosti akčného zásahu:

$$o_{4i}(\bar{x}) = \int_{t=0}^T |du_i(t, \bar{x}) / dt| dt \quad (4.16)$$

Ohraničenie veľkosti prekročenia zmeny akčného zásahu:

$$o_{5i}(\bar{x}) = \int_{t=0}^T o_{51i}(t, \bar{x}) dt \quad (4.17)$$

$$o_{51i}(t, \bar{x}) = |du_i(t, \bar{x}) / dt| - d_5 \quad \text{ak } |du_i(t, \bar{x}) / dt| > d_5 \\ = 0 \quad \text{inak} \quad (4.18)$$

Ohraničenie preregulovania:

$$o_{6i}(\bar{x}) = \eta_{reg_i}(\bar{x}) \quad (4.19)$$

Ohraničenie veľkosti prekročenia povoleného preregulovania:

$$o_{7i}(\bar{x}) = \eta_{reg_i}(\bar{x}) - d_7 \quad \text{ak } \eta_{reg_i}(\bar{x}) > d_7 \\ = 0 \quad \text{inak} \quad (4.20)$$

Ohraničenie doby regulácie:

$$o_{8i}(\bar{x}) = T_{reg_i}(\bar{x}) \quad (4.21)$$

Ohraničenie trvalej regulačnej odchýlky:

$$o_{9i}(\bar{x}) = e_i(\infty, \bar{x}) \quad (4.22)$$

Ohraničenie veľkosti prekročenia povolenej trvalej regulačnej odchýlky:

$$o_{10i}(\bar{x}) = e_i(\infty, \bar{x}) - d_{10} \quad \text{ak } e_i(\infty, \bar{x}) > d_{10} \\ = 0 \quad \text{inak} \quad (4.23)$$

Pričom $i = h, d$ je index pre skokovú zmenu želanej hodnoty smerom nahor alebo nadol, o_1, o_2, \dots, o_{10} sú funkcie čiastkových ohraničení, c_1, c_2, \dots, c_{10} sú ich koeficienty, $o_{1v}, o_{1s}, o_{3v}, o_{3s}$ a o_{51} sú pomocné funkcie čiastkových ohraničení a $d_{1v}, d_{1s}, d_{3v}, d_{3s}, d_5, d_7$ a d_{10} sú hodnoty ohraničení jednotlivých funkcií čiastkových ohraničení. d_{1v} predstavuje hodnotu horného (vrchného) ohraničenia veľkosti výstupnej veličiny y_h , d_{1s} hodnotu dolného (spodného) ohraničenia veľkosti výstupnej veličiny y_d , d_{3v} a d_{3s} hodnotu horného a dolného ohraničenia veľkosti akčného zásahu u_h a u_d , d_5 a d_7 maximálnu povolenú hodnotu zmeny akčného zásahu du_{max} a preregulovania η_{max} a d_{10} hodnotu polovice veľkosti pásma necitlivosti (maximálna povolená trvalá regulačná odchýlka) δ . y_z je želaná hodnota výstupu, y_{max} je maximálna a y_{min} je minimálna hodnota výstupu, t je spojitý čas, T_{reg} je doba regulácie, T_1 je pomocná doba pre výpočet doby regulácie a T je sledovaná doba.

Výber jedincov do pracovnej skupiny

V navrhnutom programovom systéme sa do pracovnej skupiny môžu jedince vyberať kombináciou piatich spôsobov: výberom na základe miery úspešnosti, náhodným výberom, turnajovým výberom, výberom pomocou váhovaného ruletového kolesa a stochastickým rovnomerným výberom.

Výberom na základe miery úspešnosti sa vyberajú zvolené počty jedincov z prvých n najúspešnejších jedincov.

Náhodným výberom sa vyberá náhodným spôsobom (s rovnomerným rozdelením pravdepodobnosti) daný počet jedincov z populácie.

Pri turnajovom výbere sa náhodným spôsobom (s rovnomerným rozdelením pravdepodobnosti) vyberie príslušný počet dvojíc jedincov a do novej populácie postúpi ten jedinec z dvojice, ktorý má menšiu hodnotu fitness funkcie.

Výberom pomocou váhovaného ruletového kolesa sa náhodným spôsobom vyberá daný počet jedincov, kde pravdepodobnosť výberu každého jedného jedinca je daná pomerom hodnoty jeho fitness funkcie a súčtu hodnôt fitness funkcií všetkých jedincov v populácii. Dá sa to pripodobniť k točeniu ruletovým kolesom, kde je toľko výsekov, koľko je jedincov v populácii a ich veľkosť je priamo úmerná k hodnote fitness funkcií príslušných jedincov. Kolesom sa točí toľkokrát, koľko jedincov sa vyberá.

Stochastický rovnomerný výber funguje podobne ako výber pomocou váhovaného ruletového kolesa, akurát sa na začiatku vyberá iba jeden jedinec a ostatné jedince sa určia podľa tohto. Na ruletovom kolese je toľko ukazovateľov výberu, koľko jedincov sa vyberá a sú rozmiestnené rovnomerne po obvode kolesa. Ruletové koleso sa točí iba raz a vyberú sa tie jedince, ktoré ukazujú ukazovatele. (Sekaj 2005)

Kríženie

V programovom systéme boli navrhnuté 2 typy kríženia parametrov fuzzy PID regulátora. Jeden typ kríženia slúži na výmenu vstupnej alebo výstupnej fuzzy premennej ako celku a druhý typ kríženia vymieňa jednotlivé fuzzy množiny.

V genetickom algoritme sa vykonávajú obidva typy kríženia. Najskôr kríženie s výmenou celých fuzzy premenných a potom kríženie s výmenou fuzzy množín. Pri obidvoch typoch sa zadáva miera kríženia, ktorej hodnota môže byť v rozsahu 0 až jedna. Dva jedince si danú fuzzy premennú alebo fuzzy množinu vymenia s pravdepodobnosťou, ktorá je rovná tejto miere kríženia. Pri výmene fuzzy množín sa musí ešte skontrolovať, či po výmene bude daná fuzzy premenná spĺňať pravidlá návrhu fuzzy systémov, ktoré boli spomenuté vyššie. Ak by nespĺňala, daná fuzzy množina sa nevymení.

Mutácia

V programovom systéme bola navrhnutá operácia mutácie pre fuzzy systémy. Ide o obyčajnú mutáciu vo zvolenom rozsahu. Argumentom operácie je miera mutácie m v rozsahu 0 až 1.

Ďalším nepovinným argumentom je koeficient (dolného) rozsahu mutácie k_{md} (tiež z rozsahu 0 až 1). V prípade hodnoty 1, ide o mutáciu v celom povolenom rozsahu (ak sa argument nezadá, prednastaví sa táto hodnota) a 0 značí situáciu s nulovým rozsahom, čiže bez mutácie. V prípade inej hodnoty v rozmedzí 0 až 1 sa dolná hranica rozsahu r_d určí ako súčasná hodnota parametra x od ktorej sa odpočíta veľkosť dolného možného rozsahu

(súčasná hodnota x – dolná hranica možného rozsahu r_{dmax}) prenasobená koeficientom (dolného) rozsahu mutácie k_{rmd} .

$$r_d = x - (x - r_{dmax}) * k_{rmd} \quad (4.24)$$

Ak je zadaný aj tretí argument, tento predstavuje koeficient horného rozsahu mutácie k_{rmh} (tiež v rozsahu 0 až 1).

Horná hranica rozsahu r_h sa vypočíta obdobne ako dolná hranica rozsahu mutácie. Ak je zadaný koeficient horného rozsahu mutácie, použije sa ako koeficient rozsahu mutácie tento ($k_{rm} = k_{rmh}$), inak sa použije koeficient (dolného) rozsahu mutácie ($k_{rm} = k_{rmd}$). Horná hranica mutácie r_h sa potom vypočíta ako súčasná hodnota parametra x ku ktorej sa pripočíta veľkosť horného možného rozsahu (horná hranica možného rozsahu r_{hmax} - súčasná hodnota x) prenasobená koeficientom rozsahu mutácie k_{rm} .

$$r_h = x - (x - r_{hmax}) * k_{rm} \quad (4.25)$$

Daná mutácia sa v danom rozsahu vykoná s pravdepodobnosťou, ktorá je rovná miere mutácie m .

V navrhnutom genetickom algoritme sa najskôr vykoná mutácia v celom povolenom rozsahu s vybranou mierou mutácie a následne mutácia so zvoleným koeficientom (alebo koeficientami) rozsahu mutácie a mierou mutácie.

Výber jedincov do novej generácie

Do novej generácie prechádzajú všetky jedince z pracovnej skupiny a vybrané jedince z aktuálnej generácie, ktoré sa v navrhnutom programovom systéme môžu vyberať kombináciou piatich spôsobov, podobne ako pri výbere do pracovnej skupiny: výberom na základe miery úspešnosti, náhodným výberom, turnajovým výberom, výberom pomocou váhovaného ruletového kolesa a stochastickým rovnomerným výberom. V prípade výberu na základe miery úspešnosti sa vyberá pri výbere n jedincov jeden najúspešnejší jedinec, jeden druhý najúspešnejší jedinec, ..., jeden n -tý najúspešnejší jedinec. Nová generácia môže tiež obsahovať nové vygenerované jedince.

Aby sa zabezpečilo, že nová generácia nebude obsahovať duplicitné reťazce, nová populácia sa skontroluje, či takéto duplicity neobsahuje a v prípade ich zistenia budú tieto odstránené a nahradené novými vygenerovanými reťazcami.

Adaptácia parametrov fuzzy regulátora

Adaptácia parametrov fuzzy regulátora je realizovaná ako prepínanie parametrov fuzzy regulátora na základe minimalizácie euklidovskej vzdialenosti aktuálneho pracovného bodu od pracovných bodov, pre ktoré boli tieto parametre navrhnuté.

Na začiatku návrhu adaptácie sa určia pracovné body, pre ktoré sú pomocou genetického algoritmu z predchádzajúcej časti navrhnuté parametre fuzzy regulátora. Samotná adaptácia počas riadenia systému spočíva v nájdení takého pracovného bodu, pre ktorý boli dopredu

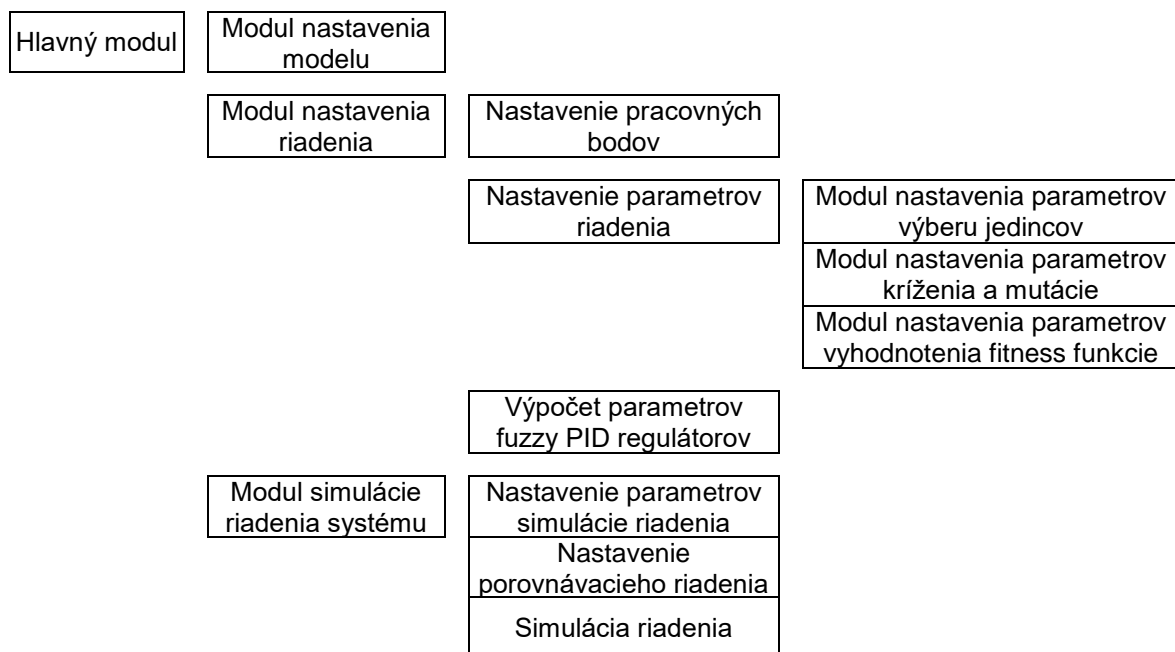
navrhnuté parametre fuzzy regulátora a pre ktorý platí:

$$(p(t), y(t)) = \min_{p(t), y(t)} (\sqrt{(p(t) - p_i(t))^2 + (y(t) - y_i(t))^2}) \quad i \in \{1, 2, \dots, N_{PB}\}, \quad (4.26)$$

kde $(p(t), y(t))$ je hľadaný pracovný bod, $p_i(t)$ je hodnota adaptívneho parametra a $y_i(t)$ je hodnota výstupnej veličiny v i -tom pracovnom bode a N_{PB} je počet pracovných bodov, pre ktoré boli navrhnuté hodnoty parametrov fuzzy regulátora.

5 Programový systém ako modulárny interaktívny systém

5.1 Grafické znázornenie programového systému



Obr.5.1 Schéma grafického znázornenia programového systému

5.2 Opis programového systému

Hlavný modul

Hlavný modul obsahuje hlavné menu a umožňuje výber z troch hlavných submodulov. Nachádza sa v súbore *Adaptive_hybrid_control.m* a jeho grafické zobrazenie v súbore *Adaptive_hybrid_control.fig*.

Modul nastavenia modelu

Modul nastavenia modelu umožňuje zadanie modelu riadeného systému a jeho parametrov. Nachádza sa v súbore *model_settings.m* a jeho grafické zobrazenie v súbore *model_settings.fig*. Obsahuje tiež funkciu *newModel.m*, pre nastavenie nového modelu (*model.mdl*) a schém, ktoré tento model využívajú (*stepSim_model.mdl*, *fuzzy_control.mdl* a *GA_fuzzy_control_sim.mdl*). Užívateľ si v nej vyberie model svojho systému a ten sa následne prekopíruje do všetkých týchto schém. V moduli sa ďalej nastavujú tieto parametre

modelu systému: jednotky a dolné a horné ohraničenia premenných vstupu (j_u, u_d, u_h), výstupu (j_y, y_d, y_h) a adaptívneho parametra (j_p, y_d, y_h), jednotka času j_t , začiatočné hodnoty vstupu u_z a výstupu y_z , perióda vzorkovania T_{vz} a doba ustálenia systému T_{ust} .

Modul nastavenia riadenia

Modul nastavenia riadenia umožňuje zadať pracovné body, parametre riadenia a taktiež vypočítať parametre fuzzy PID regulátora pre jednotlivé pracovné body. Nachádza sa v súbore *control_settings.m* a jeho grafické zobrazenie v súbore *control_settings.fig*.

Nastavenie pracovných bodov

Pracovné body sa môžu zadať automatickým alebo manuálnym spôsobom. V prípade manuálneho spôsobu sa zadávajú konkrétne pracovné body a v prípade automatického sa pracovné body vypočítajú zo zadaného počtu hodnôt adaptívneho parametra, veľkosti skokovej zmeny želanej hodnoty a primárnej vzdialenosti medzi hodnotami výstupu. Pre výpočet pracovných bodov slúži funkcia *compute_OPs*.

Funkcia *compute_OPs*

Pracovné body sa vypočítajú tak, aby pokryli celý pracovný priestor čo najrovnomernejšie. Najskôr sa vypočítajú hodnoty adaptívneho parametra:

$$p_i = p_d + (p_h - p_d)/(N_p - 1) * (i - 1), \quad (5.1)$$

kde p_i je i -tá hodnota adaptívneho parametra, p_d a p_h sú dolným a horným ohraničením adaptívneho parametra a N_p je počet hodnôt adaptívneho parametra.

Pre každú hodnotu adaptívneho parametra sa vypočítajú príslušné hodnoty výstupu tak, aby boli pre danú hodnotu adaptívneho parametra rovnomerne rozložené v celom pracovnom priestore. Pre každý adaptívny parameter sa najskôr zistí povolený rozsah výstupnej premennej tak, že sa spravia simulácie odozvy výstupu na skokové zmeny vstupnej hodnoty prostredníctvom matlabovskej funkcie *sim* a schémy *stepSim_model.mdl* a určí sa prevodová charakteristika systému pre danú hodnotu adaptívneho parametra s vybranou presnosťou akčného zásahu. Zistí sa tak dolné a horné ohraničenie výstupu pre danú hodnotu adaptívneho parametra y_{di} a y_{hi} . Hodnoty výstupu sa potom určia podľa vzťahu:

$$y_{ij} = y_{di} + (y_{hi} - y_{di} - 2 * d_{skok}) / \text{round}((y_{hi} - y_{di} - 2 * d_{skok}) / d_y) * (j - 1), \quad (5.2)$$

pre $j = 1, 2, \dots, N_{y_i}$,

kde

$$N_{y_i} = \text{round}((y_{hi} - y_{di} - 2 * d_{skok}) / d_y) + 1 \quad (5.3)$$

a y_{ij} je j -ta hodnota výstupu pre i -tu hodnotu adaptívneho parametra, d_{skok} je veľkosť skokovej zmeny želanej hodnoty, d_y je primárna vzdialenosť medzi hodnotami výstupu, N_{y_i} je počet hodnôt výstupu pre i -tu hodnotu adaptívneho parametra a *round* je funkcia zaokrúhlenia.

Z prevodových charakteristík pre jednotlivé hodnoty adaptívneho parametra sa tiež určia začiatočné hodnoty akčného zásahu pre každý pracovný bod.

Nastavenie parametrov riadenia

Modul nastavenia riadenia umožňuje tiež nastavenie parametrov normovania, genetického algoritmu a tiež vlastných parametrov riadenia.

Modul nastavenia parametrov výberu jedincov

Parametre výberu jedincov sa zadávajú prostredníctvom *modulu nastavenia parametrov výberu jedincov*. Nachádza sa v súbore *select_parameters.m* a jeho grafické zobrazenie v súbore *select_parameters.fig*.

Modul nastavenia parametrov kríženia a mutácie

Parametre kríženia a mutácie sa zadávajú prostredníctvom *modulu nastavenia parametrov kríženia a mutácie*. Nachádza sa v súbore *rate_parameters.m* a jeho grafické zobrazenie v súbore *rate_parameters.fig*.

Modul nastavenia parametrov vyhodnotenia fitness funkcie

Parametre vyhodnotenia fitness funkcie sa zadávajú prostredníctvom *modulu nastavenia parametrov vyhodnotenia fitness funkcie*. Nachádza sa v súbore *fitness_parameters.m* a jeho grafické zobrazenie v súbore *fitness_parameters.fig*.

Výpočet parametrov fuzzy PID regulátorov

Najskôr sa nastaví hodnoty pracovných bodov a parametrov riadenia z panelov *control_settings.fig*, *select_parameters.fig*, *rate_parameters.fig* a *fitness_parameters.fig*.

Samotný výpočet parametrov fuzzy PID regulátora umožňuje funkcia *GA_fuzzyPIDcontroller*, ktorá vypočíta parametre fuzzy PID regulátora pre daný pracovný bod.

Funkcia GA_fuzzyPIDcontroller

Pomocou funkcie *gen_fuzzyPID* sa vygeneruje začiatočná populácia riešení – parametrov fuzzy PID regulátora.

Daný počet generácií sa bude vykonávať cyklus vyhodnotenia jedincov, kríženia a mutácie.

Na vyhodnotenie jedincov v populácii slúži funkcia *eval_fuzzyControl*, ktorá vyhodnotí naraz všetkých jedincov v populácii. Pre každého jedinca sa najskôr prostredníctvom funkcie *setMF* nastaví fuzzy systém (*fis.fis*) pre simuláciu. Potom sa prostredníctvom funkcie *stepEval* vykoná ohodnotenie jedinca zvlášť pre skokovú zmenu želanej hodnoty smerom nahor a zvlášť pre skokovú zmenu smerom nadol. Táto funkcia umožňuje simulovať odozvy na skokovú zmenu želanej hodnoty a vyhodnotiť čiastkové fitness funkcie. Na simuláciu slúži matlabovská funkcia *sim* a schéma *fuzzy_control.mdl*. Čiastková fitness funkcia sa vypočíta ako súčet čiastkovej účelovej funkcie (4.6) (suma absolútnych hodnôt regulačnej odchýlky) a ohraničení (4.9) – (4.23) s tým, že spojité čas sa nahradí diskretným časom s periódou vzorkovania T_{vz} a integrály sa nahradia sumami. Následne sa obdobným spôsobom čiastkové účelové a fitness funkcie sčítajú do výslednej celkovej účelovej (4.5) a fitness funkcie (4.7). V prípade, že došlo k chybe pri simulácií niektorej zo skokových zmien želanej hodnoty,

účelová a fitness funkcia nadobudnú hodnotu účelovej a fitness funkcie v prípade chyby v procese vyhodnotenia (J_{chyb} a F_{chyb}).

Ak sa nejedná o poslednú generáciu, vykonajú sa operácie výberu jedincov do pracovnej skupiny, kríženia, mutácie a výberu do novej generácie.

Do pracovnej skupiny sa vyberajú príslušné zvolené počty jedincov pomocou funkcií *selbest* (výber na základe miery úspešnosti), *selrand* (náhodný výber), *seltourn* (turnajový výber), *selwru* (výber pomocou váhovaného ruletového kolesa) a *selsus* (stochastický rovnomerný výber).

Na pracovnú skupinu sa aplikujú operácie kríženia pomocou funkcie *crossov_fuzzyVariable* a *crossov_fuzzyMF*.

Funkcia *crossov_fuzzyVariable* zabezpečí kríženie jednotlivých fuzzy premenných. Jej parametrami sú matica populácie a miera kríženia fuzzy premenných v rozsahu 0 až 1. Čím väčšia je hodnota miery kríženia, tým väčšia je pravdepodobnosť, že sa dve príslušné fuzzy premenné navzájom vymenia (0 – nevymenia sa nikdy, 1 – vymenia sa vždy). Jedince v populácii sa premiešajú pomocou funkcie *shake*, usporiadajú sa tým do náhodných dvojíc, a s pravdepodobnosťou rovnajúcou sa hodnote miery kríženia si vymenia medzi sebou príslušné fuzzy premenné.

Funkcia *crossov_fuzzyMF* zabezpečí kríženie jednotlivých funkcií príslušnosti. Jej parametrami sú matica populácie a miera kríženia funkcií príslušnosti v rozsahu 0 až 1. Čím väčšia je hodnota miery kríženia, tým väčšia je pravdepodobnosť, že sa dve príslušné funkcie príslušnosti navzájom vymenia (0 – nevymenia sa nikdy, 1 – vymenia sa vždy). Jedince v populácii sa premiešajú pomocou funkcie *shake*, usporiadajú sa tým do náhodných dvojíc, a s pravdepodobnosťou rovnajúcou sa hodnote miery kríženia, ak po výmene budú splnené podmienky, ktoré musia splniť vstupné a výstupné premenné fuzzy PID regulátora (uvedené v kapitole 4 v časti o genetickom algoritme), si vymenia medzi sebou príslušné funkcie príslušnosti.

Na pracovnú skupinu sa ďalej aplikujú operácie mutácie v celom a vo zvolenom rozsahu premenných fuzzy PID regulátora pomocou funkcie *mutx_fuzzy*. Funkcia *mutx_fuzzy* zabezpečuje mutáciu parametrov fuzzy PID regulátora. Môže mať 1, 2, 3 lebo 4 parametre. Prvým parametrom je matica populácie, druhým miera mutácie, tretím dolný koeficient rozsahu a štvrtým parametrom je horný koeficient rozsahu. Hodnoty miery mutácie aj obidvoch koeficientov rozsahu sa zadávajú v rozsahu 0 až 1 (0 znamená, že mutácia sa nevykoná pre žiaden parameter fuzzy PID regulátora alebo, že v povolenom rozsahu mutácie je práve len jedna daná hodnota parametra; 1 znamená, že mutácia sa vykoná pre všetky parametre fuzzy PID regulátora alebo, že mutácia sa vykoná v celom povolenom rozsahu daného parametra). V prípade, ak sú zadané iba 3 parametre, považuje sa štvrtý parameter rovný tretiemu, ak 2 parametre, tak sa tretí aj štvrtý parameter nastaví na hodnotu 1 a ak je zadaný iba jeden parameter, tak sa navyše druhý parameter nastaví na hodnotu 0,5. Táto

funkcia využíva funkcie *changeInputVar_mut* a *changeOutputVar_mut*, ktoré zabezpečujú správnu mutáciu parametrov pre fuzzy vstupnú premennú a fuzzy výstupnú premennú tak, aby boli pre ne splnené všetky náležité podmienky (kapitola 4, Genetický algoritmus). Mutácie sa v nich vykonajú spôsobom uvedeným v kapitole 4, v časti o mutácii.

Do novej generácie prechádzajú všetky jedince z pracovnej skupiny a jedince zo súčasnej generácie, ktoré sú vyberané podobným spôsobom, ako boli vybraté jedince z pracovnej skupiny. Vyberajú sa príslušné zvolené počty jedincov pomocou funkcií *selbest*, *selrand*, *seltourn*, *selwrul* a *selsus*. Tiež do nej môžu pribudnúť nové vygenerované jedince pomocou funkcie *gen_fuzzyPID*. Takto vzniknutá populácia sa ešte skontroluje pomocou matlabskej funkcie *unique*, či neobsahuje duplicitné reťazce. V prípade ich výskytu sa tieto pomocou funkcie *gen_fuzzyPID* nahradia novými vygenerovanými jedincami.

Po vykonaní príslušného počtu generácií sa vyberie najlepší jedinec z populácie, ktorý je hľadaným reťazcom parametrov fuzzy PID regulátora pre daný pracovný bod.

Modul simulácie riadenia systému

Modul simulácie riadenia systému umožňuje nastaviť parametre simulácie riadenia a vykonať simuláciu riadenia systému s alebo bez porovnania s riadením s jednoduchým fuzzy PID regulátorom. Nachádza sa v súbore *system_control.m* a jeho grafické zobrazenie v súbore *system_control.fig*.

Nastavenie parametrov simulácie riadenia

V tejto časti sa nastavujú parametre simulácie riadenia: doba simulácie T_{sim} , presnosť akčného zásahu d_u , parametre fuzzy PID regulátorov, referenčná premenná r , adaptívny parameter p , typ interpolácie a nadpis obrázku s priebehmi výstupov zo simulácie riadenia.

Nastavenie porovnávacieho riadenia

Nastavuje sa tu, či má byť simulácia adaptívneho hybridného riadenia porovnaná s riadením s jednoduchým fuzzy PID regulátorom alebo nie. V prípade porovnania riadení sa jednoduchý fuzzy PID regulátor môže zadať vo forme parametrov fuzzy PID regulátora alebo fis štruktúry a to buď z workspace-u alebo zo súboru.

Simulácia riadenia

Najskôr sa uložia parametre z workspace-u do súboru a načítajú sa potrebné parametre modelu systému a simulácie riadenia, prípadne aj jednoduchý fuzzy PID regulátor z panelu *system_control.fig*. Funkcia *control* vykoná simuláciu riadenia.

Funkcia *control*

Ak je zvolená lineárna alebo kubická interpolácia, určia sa funkcie interpolácie jednotlivých parametrov fuzzy PID regulátora pomocou matlabskej funkcie *fit*, kde prvým argumentom sú pozície pracovných bodov, druhým argumentom sú hodnoty daného parametra

v jednotlivých pracovných bodoch a tretím argumentom je reťazec *'linearinterp'* pre lineárnu interpoláciu a *'cubicinterp'* pre kubickú interpoláciu. Vypočítajú sa tiež funkcie interpolácie pre oblasti mimo pracovný rozsah ako funkcie lineárnej interpolácie.

Simuluje sa adaptívne hybridné riadenie simuláciou schémy *GA_fuzzy_control_sim.mdl* matlabovskou funkciou *sim*. V prípade s porovnaním riadení sa simuluje aj riadenie s jednoduchým fuzzy PID regulátorom, tiež simuláciou schémy *GA_fuzzy_control_sim.mdl* matlabovskou funkciou *sim*, keďže riadenie s jednoduchým fuzzy PID regulátorom je zvláštnym prípadom adaptívneho hybridného riadenia s prepínaním s jedným pracovným bodom. Priebehy výstupnej premennej a akčného zásahu zo simulácie sa vykreslia do obrázka.

Simulácia schémy *GA_fuzzy_control_sim.mdl*

Schéma adaptívneho hybridného riadenia *GA_fuzzy_control_sim.mdl* slúži na simuláciu adaptívneho hybridného riadenia. Kľúčovým prvkom je výpočet derivácie akčného zásahu, ktorý sa vykonáva v bloku MATLAB Function *fuzzy_inference* vo funkcii *fuzz_inference*.

Funkcia *fuzzy_inference* vypočíta hodnotu derivácie akčného zásahu pre dané hodnoty normovaných vstupov, výstupu a adaptívneho parametra. V prípade adaptívneho hybridného riadenia sa určia najskôr parametre fuzzy PID regulátora. Pre adaptívne hybridné riadenie s prepínaním (interpolácia najbližšieho suseda) sa výsledné parametre určia ako parametre pracovného bodu, ktorého euklidovská vzdialenosť k aktuálnemu bodu v pracovnom priestore bude najmenšia. Euklidovská vzdialenosť sa vypočíta ako:

$$d_E = \sqrt{(y_a - y_{PB})^2 + (p_a - p_{PB})^2}, \quad (5.4)$$

kde d_E je euklidovská vzdialenosť pracovného bodu PB od aktuálnej pozície systému, hodnoty y_a a p_a predstavujú aktuálnu pozíciu systému a hodnoty y_{PB} a p_{PB} pozíciu pracovného bodu. y_a a y_{PB} sú hodnoty výstupu a p_a a p_{PB} hodnoty adaptívneho parametra.

Pre lineárnu a kubickú interpoláciu sa hodnoty parametrov fuzzy PID regulátora vypočítajú matlabovskou funkciou *feval*, ktorej prvým argumentom je vypočítaná funkcia interpolácie a druhým argumentom je aktuálna poloha systému v pracovnom priestore. V prípade riadenia s jednoduchým fuzzy PID regulátorom, sa zistia jeho parametre, ak bol nimi zadávaný.

Zistí sa fis štruktúra fuzzy regulátora. Ak nie je fuzzy regulátor už učený touto štruktúrou, ako to môže byť v prípade riadenia s jednoduchým fuzzy PID regulátorom, nastaví sa funkciou *setMF*, ktorá už bola popísaná vyššie.

Hodnota derivácie akčného zásahu sa vypočíta matlabovskou funkciou *evalfis*, kde prvým argumentom sú hodnoty normovaných vstupov do fuzzy systému a druhým argumentom je fis štruktúra fuzzy regulátora.

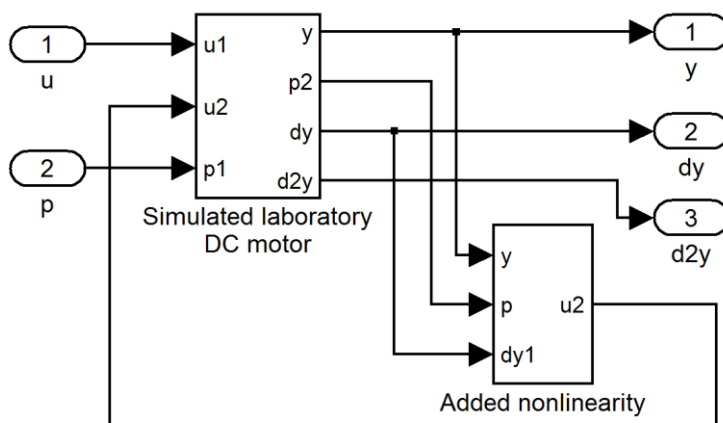
6 Prípadová štúdia: modifikovaný jednosmerný motor

6.1 Opis procesu

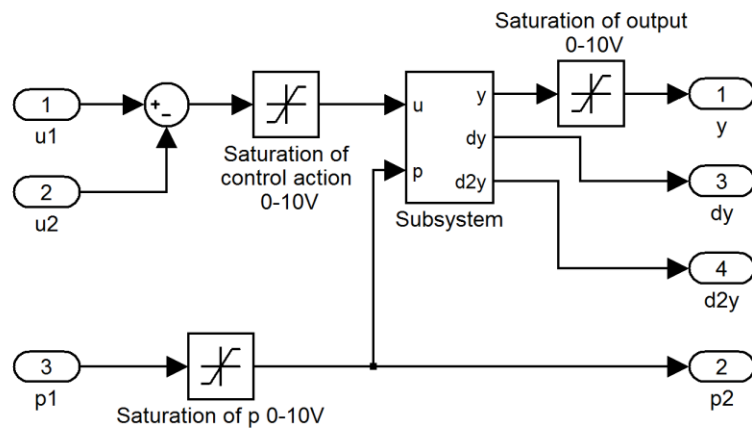
Riadeným procesom je simulovaný laboratórny jednosmerný motor s pridanou nelinearitou. Riadenou veličinou laboratórneho jednosmerného motora je uhlová rýchlosť, ktorá sa ovláda vstupným napätím z intervalu 0 – 10 V a sníma sa optickou elektronikou ako výstupné napätie, tiež v rozsahu 0 – 10 V. Adaptívny parameter predstavuje záťaž p vyjadrenú v jednotkách napätia. Tá môže nadobúdať hodnoty 1 – 10 V. Laboratórny motor je zobrazený na obrázku Obr.6.1 a simulačná schéma systému v prostredí Matlab-Simulink je na Obr.6.2. (Hypiusová a Kajan 2013)



Obr.6.1 Laboratórny jednosmerný motor

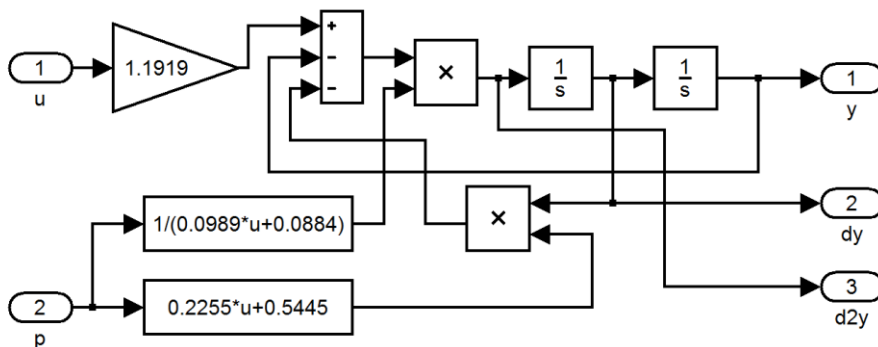


Obr.6.2 Simulačná schéma systému simulovaného laboratórneho jednosmerného motora (*Simulated laboratory DC motor*) s pridanou nelinearitou (*Added nonlinearity*), vstupom u , záťažou p , výstupom y , prvou a druhou deriváciou výstupu dy a $d2y$ v prostredí Matlab-Simulink

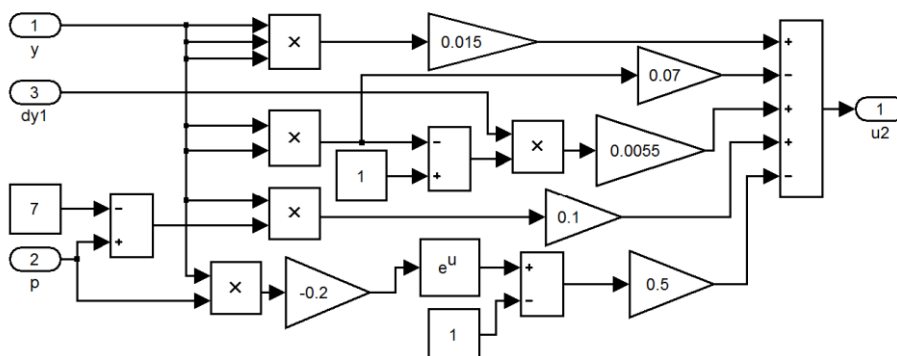


Obr.6.3 Schéma bloku simulovaného jednosmerného motora v prostredí Matlab-Simulink

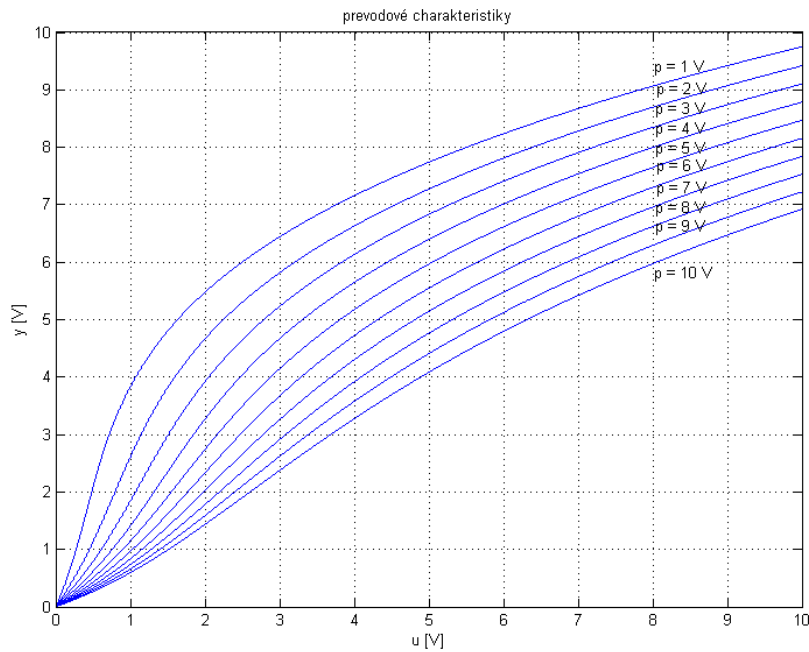
Štruktúra bloku simulovaného laboratórneho jednosmerného motora (*Simulated laboratory DC motor*) v prostredí Matlab-Simulink je zobrazená na obrázkoch Obr.6.3 a Obr.6.4. Vstupy a výstup systému sú obmedzené na povolené hodnoty. Systém je zložený z lineárnej časti, ktorá predstavuje jednoduchý jednosmerný motor a z nelineárnej časti, ktorá simuluje správanie systému so záťažou p . Blok s pridanou nelinearitou je zobrazený na obrázku Obr.6.5.



Obr.6.4 Schéma bloku jednosmerného motora v prostredí Matlab-Simulink (blok *Subsystem* z Obr.6.3)

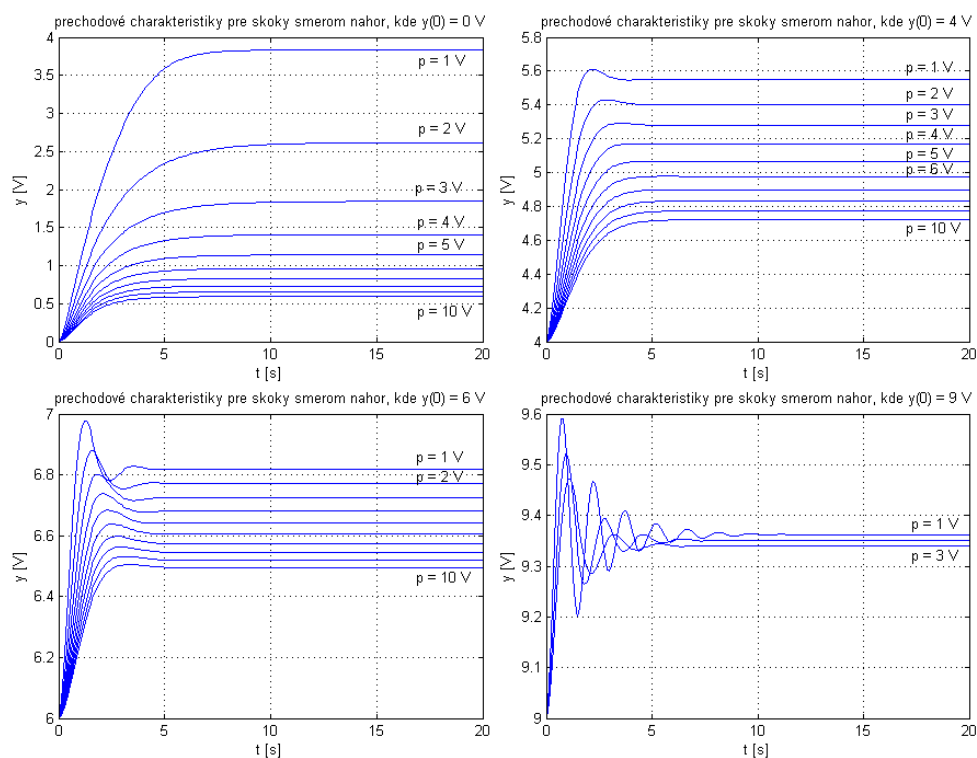


Obr.6.5 Schéma bloku pridanej nelinearity (*Added nonlinearity* z Obr.6.2) v prostredí Matlab-Simulink



Obr.6.6 Prevodové charakteristiky systému modifikovaného jednosmerného motora pre $p = 1, 2, \dots, 10 \text{ V}$

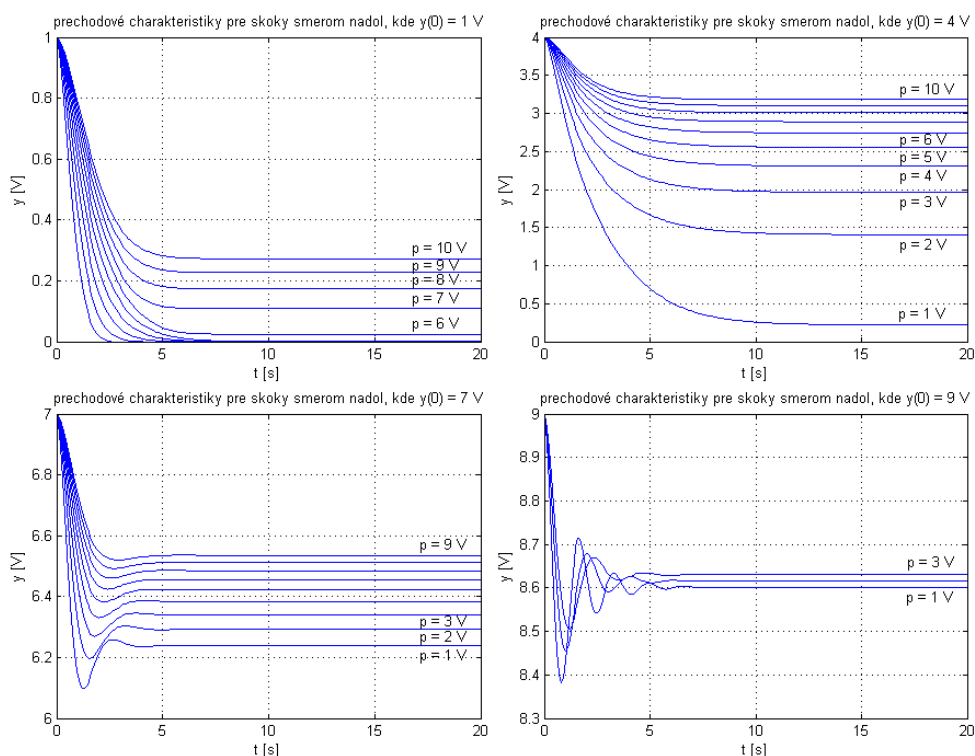
Prevodové charakteristiky systému s hodnotami záťaže $p = 1, 2, \dots, 10 \text{ V}$ sú zobrazené na obrázku Obr.6.6 Z obrázku je zrejmé, že systém obsahuje statickú nelinearitu pre každú danú hodnotu záťaže p a čím je hodnota záťaže nižšia, tým je nelinearita výraznejšia.



Obr.6.7 Prechodové charakteristiky systému modifikovaného jednosmerného motora pre skokové zmeny vstupnej premennej smerom nahor

Na obrázkoch Obr.6.7 a Obr.6.8 sú znázornené prechodové charakteristiky systému pre skokové zmeny vstupnej premennej smerom nahor (Obr.6.7) a nadol (Obr.6.8). Na obrázku Obr.6.7 sú vľavo hore zobrazené prechodové charakteristiky so začiatočnou hodnotou výstupu $y(0) = 0 \text{ V}$ pre hodnoty adaptívneho parametra $p = 1, 2, \dots, 10 \text{ V}$, vpravo hore prechodové charakteristiky s $y(0) = 4 \text{ V}$ a vľavo dole s $y(0) = 6 \text{ V}$, obidvoje pre $p = 1, 2, \dots, 10 \text{ V}$ a vpravo dole prechodové charakteristiky s $y(0) = 9 \text{ V}$ pre $p = 1, 2$ a 3 V . Na obrázku Obr. 8 sú vľavo hore prechodové charakteristiky s $y(0) = 1 \text{ V}$ a vpravo hore s $y(0) = 4 \text{ V}$, oboje pre $p = 1, 2, \dots, 10 \text{ V}$, vľavo dole prechodové charakteristiky s $y(0) = 7 \text{ V}$ pre $p = 1, 2, \dots, 9 \text{ V}$ a vpravo dole s $y(0) = 9 \text{ V}$ pre $p = 1, 2$ a 3 V .

Pri skokových zmenách vstupnej veličiny smerom nahor sú prechodové charakteristiky s malou začiatočnou hodnotou výstupu ($y(0) = 0 \text{ V}$) silno aperiodické a s väčším zosilnením (okolo 0,5 - 4) a čím je hodnota $y(0)$ väčšia, tým sú priebehy prechodových charakteristík kmitavejšie, s väčšou amplitúdou a s menším zosilnením (pri $y(0) = 9 \text{ V}$ je hodnota zosilnenia okolo 0,35). Pri skokových zmenách vstupnej veličiny smerom nadol je veľkosť zosilnenia najväčšia pri $y(0) = 4 \text{ V}$ (okolo 0,75 až 4) a priebehy prechodových charakteristík sú silno aperiodické a čím je hodnota $y(0)$ väčšia, tým sú veľkosti zosilnení systému menšie (pri $y(0) = 9 \text{ V}$ je veľkosť zosilnenia okolo 0,4) a priebehy sú kmitavejšie, s väčšou amplitúdou. Čím je zas hodnota $y(0)$ menšia, tým sú veľkosti zosilnení systému menšie (pri $y(0) = 1 \text{ V}$ je veľkosť zosilnenia okolo 0,7 - 1) a doba ustálenia systému je kratšia. Pre oba typy skokových zmien vstupnej veličiny platí, že čím je hodnota adaptívneho parametra p menšia, tým sú prechodové charakteristiky kmitavejšie a zosilnenie systému je väčšie.



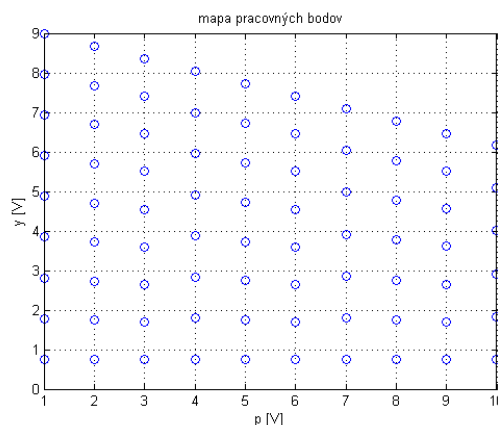
Obr.6.8 Prechodové charakteristiky systému modifikovaného jednosmerného motora pre skokové zmeny vstupnej premennej smerom nadol

System modifikovaného jednosmerného motora je systém s kladným zosilnením, bez podkmitov a je preto vhodný na riadenie navrhnutým adaptívnym hybridným riadením s prepínaním s fuzzy PID regulátormi s danou 3-D bázou pravidiel.

6.2 Návrh riadenia

6.2.1 Rozmiestnenie pracovných bodov

Pracovný priestor sme pokryli pracovnými bodmi. Použili sme na to automatický spôsob rozmiestnenia pracovných bodov vo vytvorenom programovom systéme, kde sme nastavili počet hodnôt adaptívneho parametra $N_p = 10$, primárnu vzdialenosť medzi hodnotami výstupu $d_y = 1$ V, veľkosť skokovej zmeny želanej hodnoty $d_{skok} = 0,75$ V a presnosť akčného zásahu $d_u = 0,001$ V. Dostali sme tak 78 pracovných bodov (Obr.6.9).



Obr.6.9 Mapa navrhnutých pracovných bodov v pracovnom priestore

6.2.2 Výpočet parametrov fuzzy PID regulátora

Pre každý z týchto pracovných bodov sme pomocou genetického algoritmu navrhli parametre fuzzy PID regulátora. V programovom systéme sme nastavili parametre normovania:

- derivácie výstupu $gain_1 = 4$,
- druhej derivácie výstupu $gain_2 = 2$,
- derivácie akčného zásahu $gain_3 = 1$.

Tieto boli určené experimentálnym spôsobom, z odoziev systému na riadenie s PID regulátorom a následným ručným doladovaním.

Ďalej sme nastavili parametre riadenia:

- dobu simulácie $T_{sim} = 20$ s,
- maximálnu povolenú veľkosť derivácie akčného zásahu $du_{max} = 1$ V,
- maximálnu povolenú hodnotu preregulovania $\eta_{max} = 5$ %,
- hodnotu polovice veľkosti pásma necitlivosti $\delta = 0,5$ %.

Hodnoty veľkosti skokovej zmeny želanej hodnoty výstupu $d_{skok} = 0,75$ V a presnosti akčného zásahu $d_u = 0,001$ V už boli prednastavené z nastavenia pracovných bodov.

Nastavili sme parametre genetického algoritmu:

počet jedincov v populácii $N_j = 20$,

počet generácií $N_g = 200$.

6.2.3 Parametre fuzzy PID regulátora a inormácie o výpočte

Vypočítané parametre fuzzy PID regulátorov sme spolu s informáciami o výpočte uložili do premennej *OPparams* v súbore *OPparams_motor.mat*. Premená *OPparams* obsahuje 78 štruktúr, pre každý pracovný bod jednu, s informáciami o výpočte parametrov fuzzy PID regulátora, spolu s týmito parametrami a informáciou o pracovnom bode. Zoznam parametrov fuzzy PID regulátora pre jednotlivé pracovné body sa nachádza v prílohe C. Príklad štruktúry *OPparams*:

OPparams{1}:

p: 1

rs: 0.750000000000000

params: [1x38 double]

Fit: 4.838600046600295e+002

cost: 49.434246319934857

Fit1: 1.912668740443425e+002

cost1: 22.177006938715152

Fit2: 2.925931306156870e+002

cost2: 27.257239381219705

Fittrend: [1x200 double]

costtrend: [1x200 double]

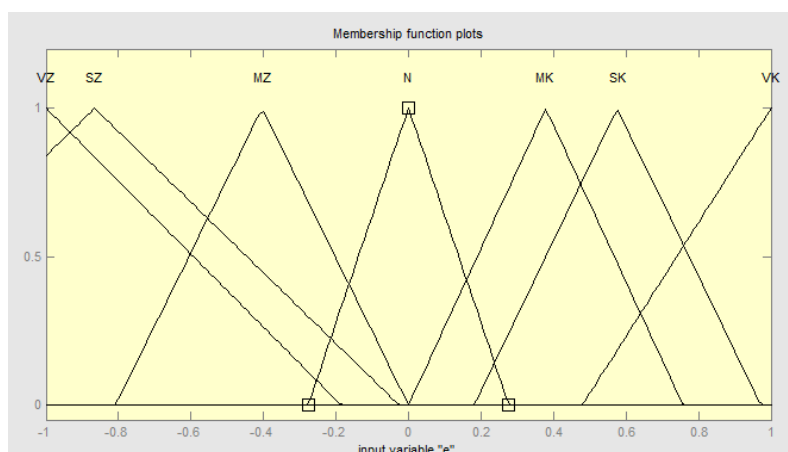
Overruns1: [1x1 struct]

Overruns2: [1x1 struct]

Step1: [1x1 struct]

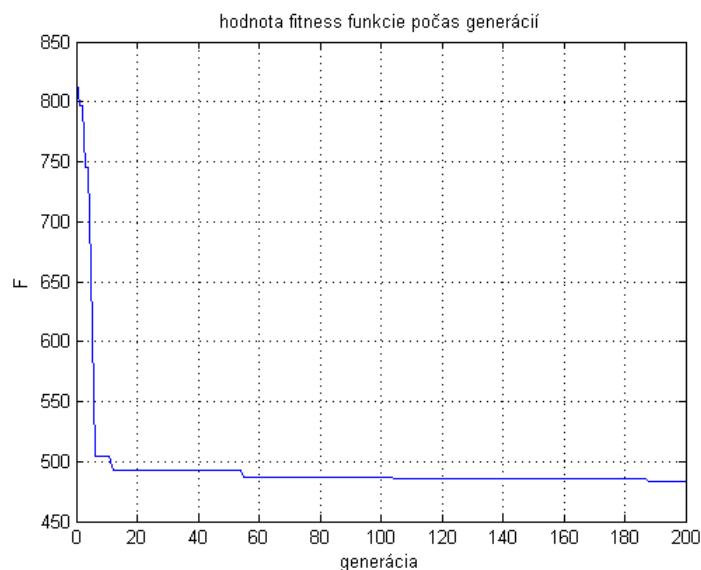
Step2: [1x1 struct]

Na obrázku Obr.6.10 je zobrazené grafické znázornenia funkcií príslušnosti vstupnej fuzzy premennej e daného nastavenia parametrov fuzzy PID regulátora.



Obr.6.10 Grafické znázornenie funkcií príslušnosti vstupnej fuzzy premennej $e = e(t)$ fuzzy PID regulátora pre pracovný bod $p = 1$ V, $y = 0,75$ V

Na obrázku Obr.6.11 je zachytený priebeh hodnoty fitness funkcie počas generácií v danom pracovnom bode. Hodnoty tohto priebehu sa nachádzajú v premennej *OPparams{1}.Fittrend*, ku ktorým je ešte pridaná posledná hodnota tejto funkcie z premennej *OPparams{1}.Fit*.



Obr.6.11 Hodnota fitness funkcie počas generácií v pracovnom bode $p = 1 \text{ V}$, $y = 0,75 \text{ V}$

V premenných *OPparams{1}.Overruns1* a *OPparams{1}.Overruns2* sa nachádzajú informácie o kvalite riadenia systému pri skokovej zmene želanej hodnoty smerom nahor (*OPparams{1}.Overruns1*) a nadol (*OPparams{1}.Overruns2*).

OPparams{1}.Overruns1:

Sum_ouerrun_y1: 0
 Ouerrun_y1: {{1x1 cell}}
 Sum_dy1: 7.537751039529514
 Sum_ouerrun_u1: 0
 Ouerrun_u1: {{1x1 cell}}
 Sum_du1: 2.633555159367401
 Sum_ouerrun_du1: 0
 Ouerrun_du1: {{1x1 cell}}
 Max_ouershoot1:
 0.003088864759689
 Dif_max_ouershoot1: 0
 Tcon1: 7.100000000000001
 SsError1: 2.315215244112305e-005
 Dif_ssError1: 0

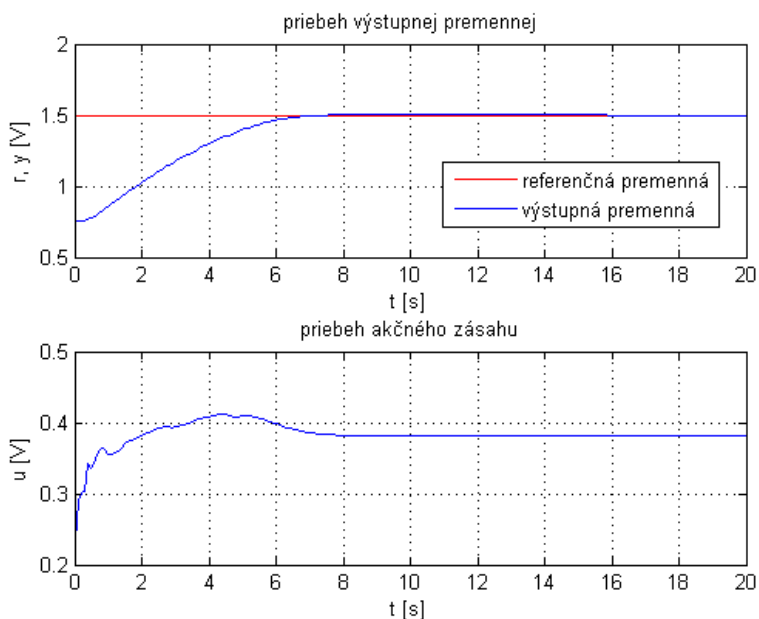
OPparams{1}.Overruns2:

Sum_ouerrun_y2: 0
 Ouerrun_y2: {{1x1 cell}}
 Sum_dy2: 7.488240200959909
 Sum_ouerrun_u2:
 0.038481671680547
 Ouerrun_u2: {{1x1 cell}}
 Sum_du2: 2.273853967741937
 Sum_ouerrun_du2: 0
 Ouerrun_du2: {{1x1 cell}}
 Max_ouershoot2: 0
 Dif_max_ouershoot2: 0
 Tcon2: 11.900000000000000
 SsError2: 3.603688972432457e-005
 Dif_ssError2: 0

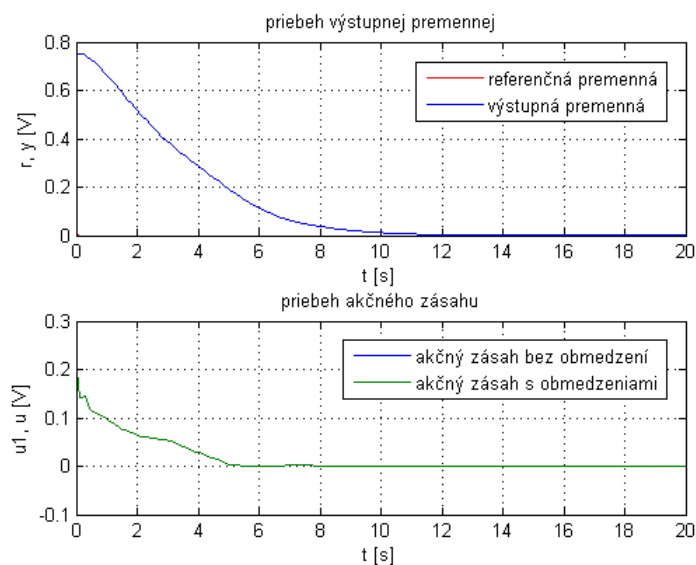
Ako vidno z vyhodnotení, kvalita riadenia je dobrá. Veľkosť preregulovania je pod 5% a doba riadenia do 12 s. Sumy prekročení povolených výstupov a derivácií akčných zásahov sú pri oboch typoch skokových zmien želanej hodnoty nulové. Pri skokových zmenách želanej hodnoty smerom nadol však došlo k prekročeniu povolených hodnôt akčného zásahu. Tieto

prekročenia sú ale v riadení ošetrené obmedzením akčného zásahu na dané povolené hodnoty.

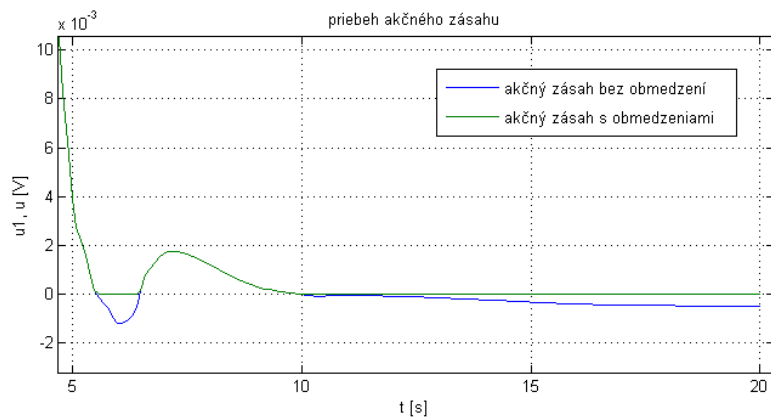
Na obrázkoch Obr.6.12 – Obr.6.14 sú zobrazené odozvy výstupnej veličiny a akčného zásahu s obmedzeniami (y a u) spolu s referenčnou premennou r na skokovú zmenu želanej hodnoty s veľkosťou 0,75 V smerom nahor (Obr.6.12) a nadol (Obr.6.13 a Obr.6.14). Na obrázkoch Obr.6.13 a Obr.6.14 je okrem toho zobrazená aj odozva akčného zásahu bez obmedzení $u1$. Na Obr.6.14 je detail odozvy akčného zásahu bez obmedzení $u1$ a s obmedzeniami u .



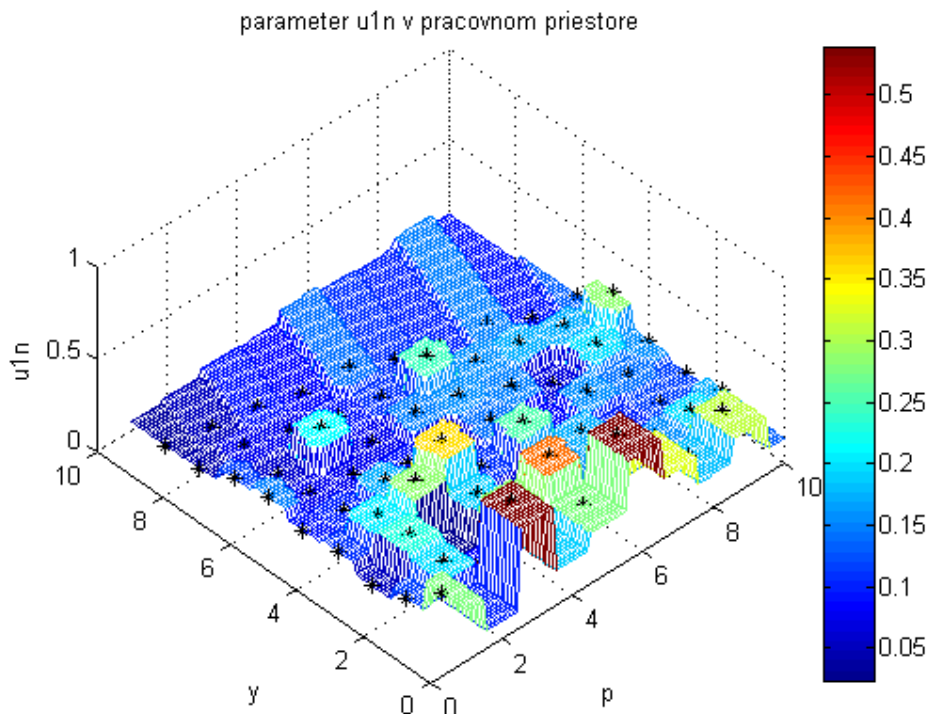
Obr.6.12 Odozvy výstupnej veličiny a akčného zásahu s obmedzeniami (y a u) na skokovú zmenu želanej hodnoty s veľkosťou 0,75 V smerom nahor



Obr.6.13 Odozvy výstupnej veličiny a akčného zásahu s obmedzeniami (y a u) na skokovú zmenu želanej hodnoty s veľkosťou 0,75 V smerom nadol



Obr.6.14 Odozvy akčného zásahu s obmedzeniami u a bez obmedzení u_1 na skokovú zmenu želanej hodnoty s veľkosťou 0,75 V smerom nadol – detail



Obr.6.15 Rozloženie hodnôt parametra u_1n v pracovnom priestore s použitím interpolácie najbližšieho suseda

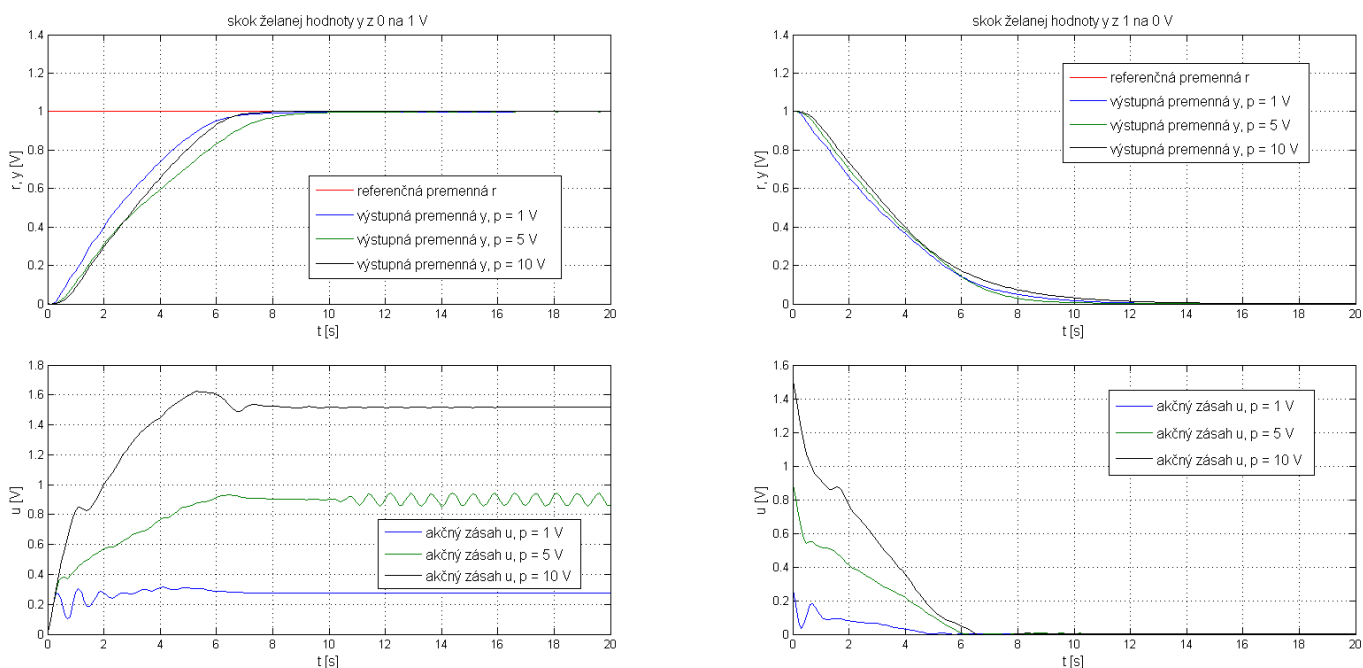
Na obrázku Obr.6.15 je príklad rozloženia hodnôt parametrov fuzzy PID regulátora v pracovnom priestore pre prvý parameter u_1n . Pracovné body, pre ktoré bol uskutočnený výpočet, sú označené hviezdičkou, ostatné sú zobrazené vo farebnej škále.

6.2.4 Vyhodnotenie riadenia

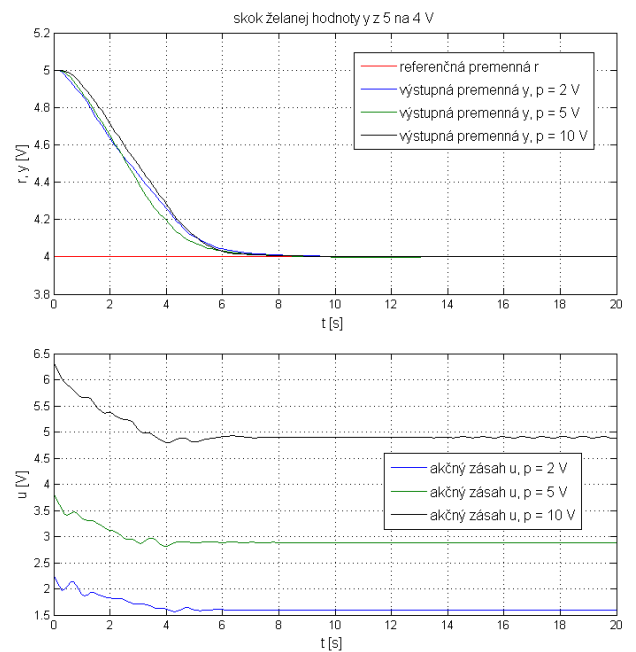
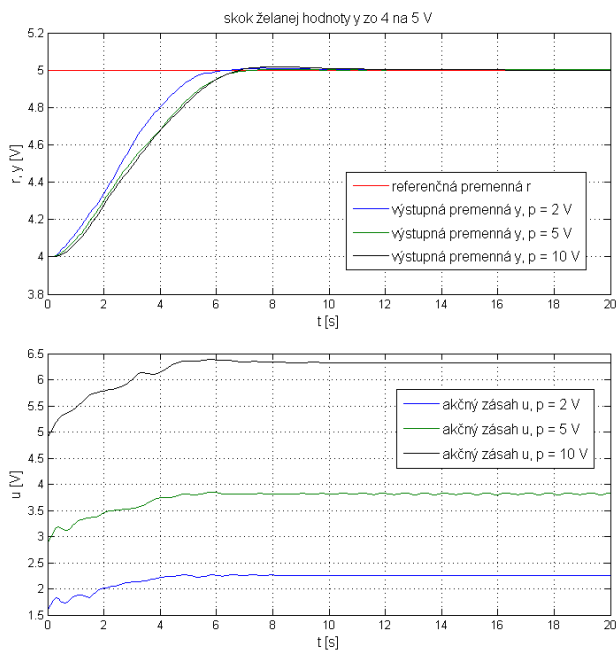
Navrhnuté riadenie sme otestovali na jednotkových skokových zmenách želanej hodnoty pri rôznych hodnotách adaptívneho parametra p (Obr.6.16, Obr.6.17 a Obr.6.18) a na sérii skokových zmien želanej hodnoty pri meniacej sa hodnote p (Obr.6.19).

Na obrázkoch Obr.6.16, Obr.6.17 a Obr.6.18 sa nachádzajú priebehy výstupnej veličiny y (hore) a akčného zásahu u (dole) pri adaptívnom hybridnom riadení s prepínaním pri jednotkových skokových zmenách želanej hodnoty smerom nahor (naľavo) a nadol (napravo). Na Obr. 16 sú zachytené priebehy pri skokovej zmene želanej hodnoty z 0 na 1 V a z 1 na 0 V, keď adaptívny parameter nadobúda hodnoty 1, 5 a 10 V, na Obr.6.17 priebehy pri skokových zmenách zo 4 na 5 V a z 5 na 4 V, keď $p = 2, 5$ a 10 V a na obrázku Obr.6.18 priebehy výstupnej veličiny a akčného zásahu pri skokových zmenách želanej hodnoty zo 7 na 8 V a z 8 na 7 V, keď je hodnota adaptívneho parametra 4, 5 a 6 V.

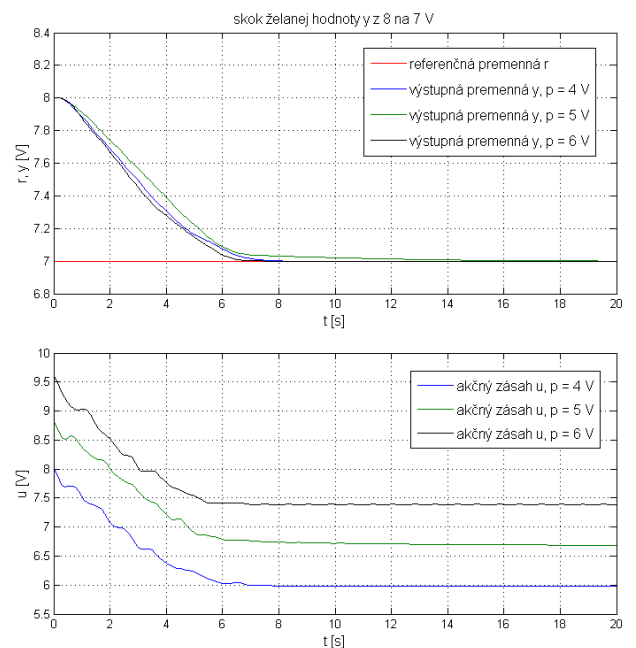
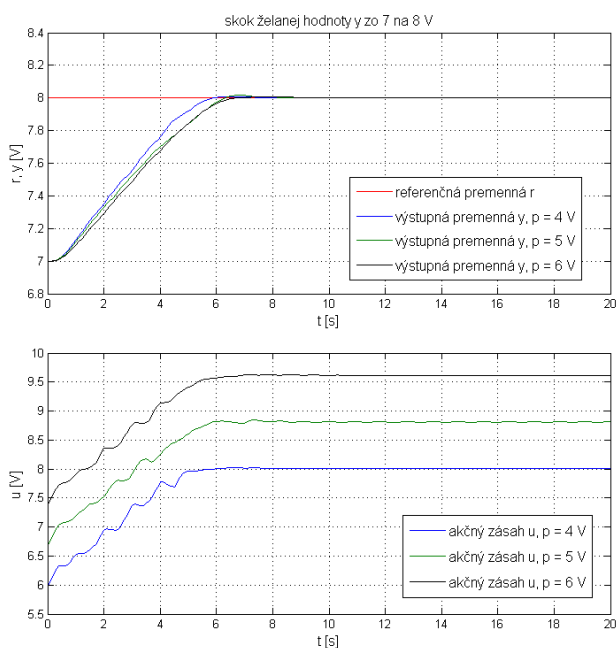
Ako vidno z obrázkov, doba regulácie je v týchto prípadoch do 15 s (pri skokových zmenách želanej hodnoty smerom nahor je najdlhšia doba regulácie 11,5 s pri skokovej zmene zo 4 na 5 V a $p = 10$ V a pri skokových zmenách želanej hodnoty smerom nadol je 15,0 s pri skokovej zmene z 8 na 7 V a $p = 5$ V) a preregulovanie nepresahuje požadované maximálne preregulovanie 5% (pri skokových zmenách želanej hodnoty smerom nahor je najväčšie preregulovanie 1,80% pri skokovej zmene zo 4 na 5 V a $p = 10$ V a zo 7 na 8 V a $p = 5$ V, a pri skokových zmenách želanej hodnoty smerom nadol je preregulovanie do 0,5%). Hodnota sumy absolútnych regulačných odchýlok je najmenšia pri skokovej zmene želanej hodnoty zo 4 na 5 V pri $p = 2$ V SAE = 27,8 a najväčšia pri skokovej zmene z 1 na 0 V a $p = 10$ V SAE = 39,3. Akčný zásah môže mať pri ustálenom stave výstupu kmitavý priebeh, ako je to napr. pri skokovej zmene želanej hodnoty z 0 na 1 V a $p = 5$ V, alebo môže byť výstup kmitavý, prípadne s trvalou regulačnou odchýlkou, ale systém sa javí ako stabilný.



Obr.6.16 Priebehy výstupnej veličiny y (hore) a akčného zásahu u (dole) pri adaptívnom hybridnom riadení s prepínaním, keď hodnoty p sú 1, 5 a 10 V, pri skokovej zmene želanej hodnoty z 0 na 1 V (naľavo) a z 1 na 0 V (napravo)



Obr.6.17 Priebehy výstupnej veličiny y (hore) a akčného zásahu u (dole) pri adaptívnom hybridnom riadení s prepínaním, keď hodnoty p sú 2, 5 a 10 V, pri skokovej zmene želanej hodnoty zo 4 na 5 V (naľavo) a z 5 na 4 V (napravo)



Obr.6.18 Priebehy výstupnej veličiny y (hore) a akčného zásahu u (dole) pri adaptívnom hybridnom riadení s prepínaním, keď hodnoty p sú 4, 5 a 6 V, pri skokovej zmene želanej hodnoty zo 7 na 8 V (naľavo) a z 8 na 7 V (napravo)

Na obrázku Obr.6.19 sú porovnané adaptívne hybridné riadenie s prepínaním s riadením s jednoduchým fuzzy PID regulátorom pri meniacom sa adaptívnom parametri p a sérii skokových zmien želanej hodnoty. Jednoduchý fuzzy PID regulátor bol navrhnutý genetickým algoritmom pre pracovný bod ležiaci v strede pracovného priestoru $p = 5,5$ V a $y = 4,155109428324434$ V a pre skokové zmeny želanej hodnoty smerom nahor a nadol s veľkosťou 4,155109428324434 V.

V hornej časti obrázka sú porovnané priebehy výstupnej premennej y z adaptívneho hybridného riadenia a z riadenia s jednoduchým fuzzy PID regulátorom y_c . V dolnej časti obrázka sú zobrazené zas priebehy akčného zásahu z adaptívneho hybridného riadenia u a z riadenia s jednoduchým fuzzy PID regulátorom u_c .

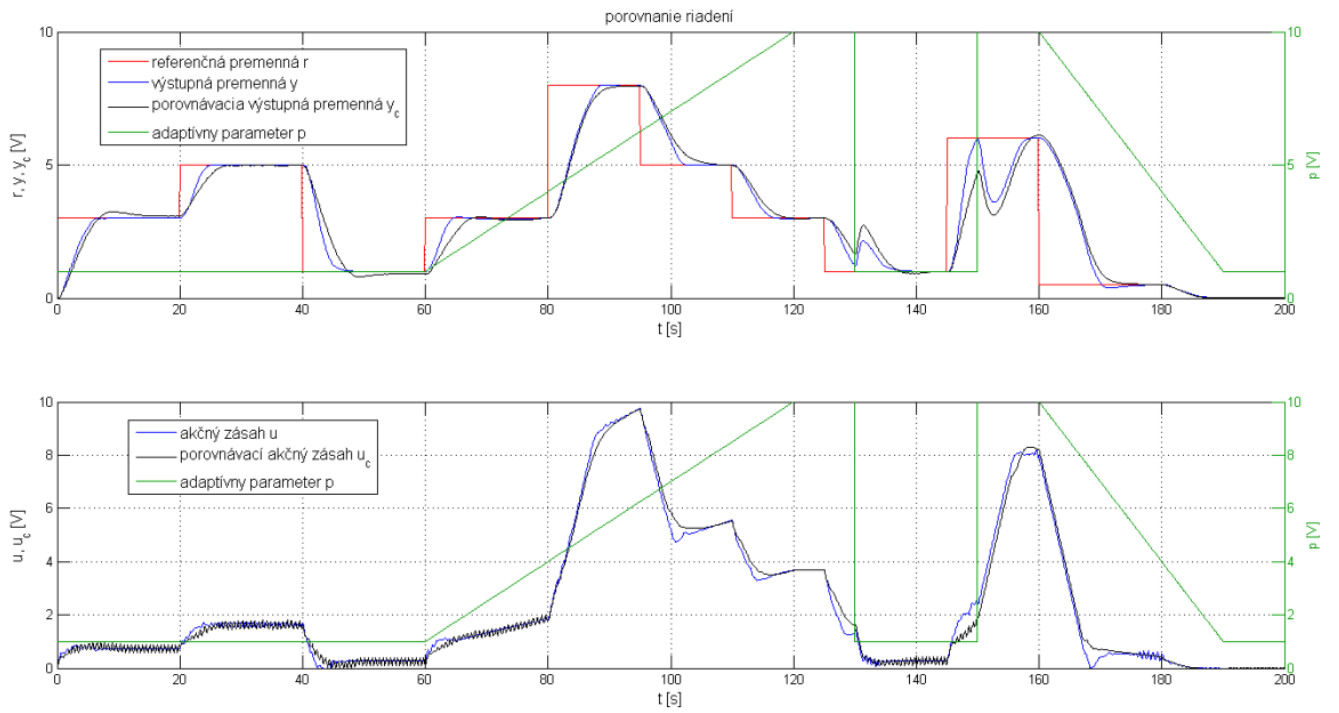
V adaptívnom hybridnom riadení s prepínaním je doba regulácie je pri jednotlivých skokových zmenách do 16 s ($T_{reg} = 16,0$ s pri predposlednej skokovej zmene, zo 6 V na 0,5 V) a veľkosť preregulovania je do 3% (max. 2,23% pri 4. skokovej zmene, z 1 na 3 V). Pri piatej skokovej zmene, z 3 na 8 V sa hodnota adaptívneho parametra p plynule zväčšuje, až takmer dosiahne maximum, ktoré dokáže systém uradiť na hodnote výstupu $y = 8$ V. Napriek tomu je hodnota výstupu ustálená na požadovanej hodnote 8 V až do momentu ďalšej skokovej zmeny želanej hodnoty. 8. a 9. skoková zmena sú charakteristické prudkou zmenou hodnoty adaptívneho parametra p z 10 na 1 V pri 8. skokovej zmene a z 1 na 10 V pri 9. skokovej zmene želanej hodnoty. Výstupná premenná y reaguje na tieto zmeny prekritom opačným smerom, ako je želaná hodnota, ale po krátkom čase dokáže systém výstupnú premennú znova dostať na požadovanú hodnotu.

Adaptívne hybridné riadenie s prepínaním je väčšinou rýchlejšie (okrem predposlednej a poslednej skokovej zmeny želanej hodnoty) a výstupná premenná z riadenia s jednoduchým fuzzy PID regulátorom častokrát ani nedosiahne želanú hodnotu. Hodnoty preregulovaní pri riadení s jednoduchým fuzzy PID regulátorom sú zväčša väčšie (okrem 7. skokovej zmeny želanej hodnoty, z 5 na 3 V a predposlednej skokovej zmeny, zo 6 na 0,5 V) a v 2 prípadoch sú dokonca väčšie ako hodnota maximálneho povoleného preregulovania (8,29% pri 1. skokovej zmene želanej hodnoty, z 0 na 3 V a 5,11% pri 3. skokovej zmene, z 5 na 1 V).

Priebehy akčného zásahu z riadenia s jednoduchým fuzzy PID regulátorom sú kmitavejšie ako z riadenia s adaptívnym hybridným riadením s prepínaním. Suma absolútnych hodnôt regulačných odchýlok je v prípade adaptívneho hybridného riadenia s prepínaním $SAE = 1366$ a v prípade riadenia s jednoduchým fuzzy PID regulátorom $SAE = 1684$.

Z obrázkov a nameraných hodnôt vidno, že adaptívne hybridné riadenie s prepínaním dosahuje lepšie výsledky ako riadenie s jednoduchým fuzzy PID regulátorom a je vhodnejšie na riadenie tohto systému.

Pri niektorých skokových zmenách želanej hodnoty, najmä pri skokových zmenách na vyššie hodnoty, alebo keď sa mení hodnota adaptívneho parametra, môže aj pri adaptívnom hybridnom riadení s prepínaním dôjsť k trvalej regulačnej odchýlke. Môže sa tiež stať, že veľkosť preregulovania pri adaptívnom hybridnom riadení je väčšia ako jej maximálna požadovaná hodnota, tiež pri zmenách adaptívneho parametra. Niektoré problémy by sa dali pravdepodobne odstrániť väčšou veľkosťou skokovej zmeny želanej hodnoty pri návrhu riadenia alebo väčším počtom pracovných bodov, pre ktoré sú navrhované parametre fuzzy PID regulátora.



Obr.6.19 Porovnanie adaptívneho hybridného riadenia s prepínaním (y , u) a riadenia s jednoduchým fuzzy regulátorom (y_c , u_c), pri rôznych skokových zmenách želananej hodnoty, keď sa hodnoty p menia

7 Záver

Inteligentné metódy modelovania a riadenia (fuzzy logika, umelé neurónové siete a genetické algoritmy) naberajú v posledných rokoch na význame tak z výskumno-vývojových nových riešení ako aj z praktického pohľadu využitia týchto metód v praxi. V dôsledku zvyšovania výpočtového výkonu počítačov už nie je problém používať tieto metódy aj na problémy, kde to predtým nebolo možné z hľadiska časovej alebo technickej náročnosti.

Každá z týchto metód má svoje výhody aj nevýhody. Logickým vyústením je preto snaha spájania týchto metód a kombinovania ich dobrých vlastností za účelom dosiahnutia čo najlepších modelov a riadiacich systémov, ktoré by zohľadňovali špecifické vlastnosti riadených systémov a požiadavky riadenia.

V predloženej dizertačnej práci je navrhnutý nový prístup riadenia nelineárnych systémov s viacerými vstupmi, v ktorom je využitý hybridný prístup s využitím fuzzy logiky a genetických algoritmov. Navrhnuté adaptívne hybridné riadenie s prepínaním bolo aplikované do programového systému realizovaného v programovom prostredí Matlab 7.11.0 (R2010b) a Matlab-Simulink, v grafickom užívateľskom rozhraní.

Adaptívne hybridné riadenie je overené na príklade riadenia modifikovaného jednosmerného motora. Je to simulovaný fyzikálny model laboratórneho motora s pridanou nelinearitou a vyznačuje sa statickou aj dynamickou nelinearitou. Navrhnuté riešenie podľa novej metodiky má vysokú kvalitu riadenia a v porovnaní s riadením s jednoduchým fuzzy PID regulátorom sa vyznačuje rýchlejšim riadením a menším počtom trvalých regulačných odchýlok a veľkých preregulovaní. Ďalšie zlepšenie vlastností navrhnutého riešenia by sa dalo uskutočniť zväčšením veľkosti skokovej zmeny želananej hodnoty pri návrhu riadenia alebo zväčšením počtu pracovných bodov, pre ktoré sú navrhované parametre fuzzy regulátora.

Adaptívne hybridné riadenie s prepínaním je nová inovatívna metóda riadenia, ktorá umožňuje riadenie nelineárnych MISO (multi input single output) systémov s vysokou kvalitou riadenia. Umožňuje kvalitné riadenie vo všetkých bodoch pracovného priestoru, aj keď sú charakteristiky systému v daných bodoch značne odlišné.

Táto nová metodika riadenia je otvorená a dala by sa vylepšiť a rozšíriť o adaptáciu s plynulou zmenou parametrov fuzzy regulátora realizovanou lineárnou alebo kubickou interpoláciou, prípadne iným typom interpolácie alebo aproximácie, ako sú napr. umelé neurónové siete. Vo fuzzy regulátore by sa takto dala optimalizovať okrem funkcií príslušnosti aj báza pravidiel. Pri návrhu fuzzy regulátora by sa dala tiež využiť učiaca schopnosť umelých neurónových sietí, spojením fuzzy systému s umelou neurónovou sieťou naučiť fuzzy systém na už existujúce riadenie.

Výsledky dizertačnej práce sa dajú využiť v riadení nelineárnych systémov v priemyselnej oblasti (robotika, mechatronika, chemicko - technologické procesy, biotechnológie a pod.).

Použitá literatúra

- ARDALAN, H.- ESLAMI, A.- NARIMAN-ZADEH, N. 2008. Piles shaft capacity from CPT and CPTu data by polynomial neural networks and genetic algorithms. In *Computers and Geotechnics*.
- ARIFOVIC, J. - GENÇAY, R. 2001. Using genetic algorithms to select architecture of a feedforward artificial neural network. *Physica A* 289, 574-594
- ATSALAKIS, G. S. - VALAVANIS, K. P. 2009. Forecasting stock market short-term trends using a neuro-fuzzy based methodology. *Expert Systems with Applications* Volume 36, Issue 7, str. 10696-10707
- BODYANSKIY, Y. DOLOTOV, A. - PLISS, I. 2009. Adaptive Gustafson-Kessel Fuzzy Clustering Algorithm Based on Self-Learning Spiking Neural Network. Supplement to International Journal "Information Technologies and Knowledge" Volume 3 / 2009, s. 17-25
- BRANKE, J. 1995. Evolutionary Algorithms for Neural Network Design and Training. Technical Report No. 322, University of Karlsruhe, Institute AIFB and In TAlander, editor, *Proceedings of the 1st Nordic Workshop on Genetic Algorithms and its Applications*. Vaasa, Finland
- CAPI, G. - DOYA, K. 2005. Evolution of recurrent neural controllers using an extended parallel genetic algorithm. In *Robotics and Autonomous Systems* 52, str. 148-159
- CURRY, B. - MORGAN, P. H. 2004. Evaluating Kohonen's learning rule: An approach through genetic algorithms. In *European Journal of Operational Research* 154, str. 191-205.
- CHAN, K. Y. - KWONG, C. K. - TSIM, Y. C. 2010. Modelling and optimization of fluid dispensing for electronic packaging using neural fuzzy networks and genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* Volume 23, Issue 1, str. 18-26
- CHEN, T. 2006. An intelligent hybrid system for wafer lot output time prediction. [online], [cit. 2010-03-30]. Dostupné na internete http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6X1X-4N0YV3X-6&_user=10&_coverDate=01%2F31%2F2007&_alid=1281939788&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_cdi=7254&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=59&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=1561ca91ec0986c0c3dfec082731c194
- CHEN, C.-Y. - FENG, H.-M. 2009. Hybrid intelligent vision-based car-like vehicle backing systems design. *Expert Systems with Applications* Volume 36, Issue 4, str. 7500-7509
- CHIANG, T.-L. - SU, C.-T. – 2003. Optimization of TQFP molding process using neuro-fuzzy-GA approach. *European Journal of Operational Research* Volume 147, Issue 1, 16, str. 156-164
- CPAŁKA, K. 2009. *On evolutionary designing and learning of flexible neuro-fuzzy structures for nonlinear classification*. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* Volume 71, Issue 12, 15, str. e1659-e1672
- DAVIS, L., 1990. *The Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, New York, New York v (Sekaj 2005)
- EFENDIGIL, T. - ÖNÜT, S. - KAHRAMAN, C. 2009. A decision support system for demand forecasting with artificial neural networks and neuro-fuzzy models: A comparative analysis. *Expert Systems with Applications* Volume 36, Issue 3, Part 2, str. 6697-6707
- FABRY-ASZTALOS, L. - ANDONIE, R. - COLLAR, C. J. - ABDUL-WAHID, S. - SALIM, N. 2008. A genetic algorithm optimized fuzzy neural network analysis of the affinity of inhibitors for HIV-1 protease. In *Bioorganic & Medicinal Chemistry* 16, str. 2903-2911.
- FAYAD, C. - PETROVIC, S. 2005. *A Fuzzy Genetic Algorithm for Real-World Job Shop Scheduling*. In *Innovations in Applied Artificial Intelligence*. Springer Berlin / Heidelberg. ISBN 978-3-540-26551-1, s. 524-533

- FENG, Y. – 2008. Dynamic Fuzzy Logic Control of Genetic Algorithm Probabilities, Degree Project. Höskolan Dalarna, Sweden, 53 s.
- FERENTINOS, K. P. 2005. Biological engineering applications of feedforward neural networks designed and parameterized by genetic algorithms. In *Neural Networks 18*, s. 934-950
- GHOLAMIAN, M.R. - GHOMI, S.M.T. F. - GHAZANFARI, M, 2007. A hybrid system for multiobjective problems – A case study in NP-hard problems. Knowledge-Based Systems Volume 20, Issue 4, str. 426-436
- GOLDBERG, D. E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimisation, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. v (Sekaj 2005)
- HAPPEL, B. L. M. - MURRE, J. M. J. 1994. The Design and Evolution of Modular Neural Network Architectures. In *Neural Networks, 7*, str. 985-1004.
- HECKERLING, P. S. - Gerber, B. S. - Tape, T. G. - Wigton, R. S. 2004. Use of genetic algorithms for neural networks to predict community-acquired pneumonia. In *Artificial Intelligence in Medicine 30*, str. 71-84
- HENNESSY, K. - MADDEN, M. G. - RYDER, A. G. 2008. Combining Genetic Algorithms, Neural Networks and Wavelet Transforms for Analysis of Raman Spectra. National University of Ireland, Galway, Ireland
- HERRERA, F. - LOZANO, M. 1999. Fuzzy Genetic Algorithms: Issues and Models. University of Granada, Spain, 25 s.
- HOMAIFAR, A. - MCCORMICK, E. 1995. Simultaneous Design of Membership Functions and Rule Sets for Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 3. No. 2
- HUSSAIN, T. S. 1997. Methods of Combining Neural Networks and Genetic Algorithms. Tutorial Presentation, ITRC/TRIO Researcher Retreat, Kingston, Ontario, Canada.
- HYPIUSOVÁ, M. – KAJAN, S. 2013. Robust controller design using edge theorem and genetic algorithm. In *International Review of Automatic Control*. (2013) 194-200.
- JAVADI, A. A. - FARMANI, R. - TAN T. P. 2005. A hybrid intelligent genetic algorithm. *Advanced Engineering Informatics* Volume 19, Issue 4, str. 255-262 *Computing in Civil Engineering*
- JAVADI-MOGHADDAM, J. - BAGHERI, A. 2010. An adaptive neuro-fuzzy sliding mode based genetic algorithm control system for under water remotely operated vehicle. *Expert Systems with Applications* Volume 37, Issue 1, str. 647-660
- JIANG, N. - ZHAO, Z. - REN, L. 2003. Design of structural modular neural networks with genetic algorithm. In *Advances in Engineering Software 34*, str. 17-24
- JONES, A. J. 1993. Genetic algorithms and their applications to the design of neural networks. In *Neural Computing & Applications*, 1(1):32-45
- JUANG, C.-F. 2004. A Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Recurrent Network Design. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 34, No. 2
- JUANG, J.-G. - LIN, R.-W. - LIU, W.-K. 2008. Comparison of classical control and intelligent control for a MIMO system. *Applied Mathematics and Computation* Volume 205, Issue 2, s. 778-791. Special Issue on Advanced Intelligent Computing Theory and Methodology in Applied Mathematics and Computation
- KERMANI, B. G. 2007. Modeling oligonucleotide probes for SNP genotyping assays using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Sensors and Actuators B: Chemical* Volume 121, Issue 2, 20, str. 462-468

- KIM, H.-S. - ROSCHKE, P. N. 2006. Design of fuzzy logic controller for smart base isolation system using genetic algorithm. *Engineering Structures* Volume 28, Issue 1, s. 84-96
- KO, H.-S. - LEE, K. Y. - KANG, M.-J. - KIM, H.-CH. 2008. Power quality control of an autonomous wind–diesel power system based on hybrid intelligent controller. *Neural Networks* Volume 21, Issue 10, str. 1439-1446 *ICONIP 2007*
- KOSIKOWSKI, M. - SUSZYŃSKI, Z. - OLIK, R. - RATAJSKI, J. - SUSZKO, T. 2009. Algorithm for the Designing of Gas Nitriding Process. Supplement to International Journal "Information Technologies and Knowledge" Volume 3
- KOZÁK. Š. 2010. Aplikovaná fuzzy logika. In: Kvasnička, V. a kol. *Umelá inteligencia a kognitívna veda II*. Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2010. ISBN 978-80-227-3284-0, s. 147 – 208.
- KOZÁK Š. 2009. Inteligentné vnorené systémy. In: Kvasnička, V. a kol. *Umelá inteligencia a kognitívna veda I*. Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2009. ISBN 978-80-227-3080-8, s. 139 – 194.
- KOZÁK Š. 2011. Nové trendy v návrhu automatických systémov riadenia. In: *Automated Control Systems for Industry 2011 : Vedecká konferencia s medzinárodnou účasťou. 24.-25.november 2011, Krakovany. - Liptovský Mikuláš : Akadémia ozbrojených síl generála M.R. Štefánika, 2011. - ISBN 978-80-8040-439-0. - . - S. 72-85 / Šostronek Mikuláš (Redaktor, editor).*
- KUŞÇU, İ. - THORNTON, C. 1994. Design of Artificial Neural Networks Using Genetic Algorithms: review and prospect. *Cognitive Science Research Paper* 319, ISSN 1350-3162, University of Sussex, Brighton, UK.
- KVASNIČKA, V. - POSPÍCHAL, J. - TIŇO, P., 2000. Evolučné algoritmy, STU Bratislava v (Sekaj 2005)
- LI, S. 2000. The development of a hybrid intelligent system for developing marketing strategy. *Decision Support Systems* Volume 27, Issue 4, str. 395-409
- LI, T. S. - SU, C. T. - CHIANG, T. L. 2003. Applying robust multi-response quality engineering for parameter selection using a novel neural–genetic algorithm. *Computers in Industry* 50 113–122
- LI, Y. 2009. Hybrid intelligent approach for modeling and optimization of semiconductor devices and nanostructures. *Computational Materials Science* Volume 45, Issue 1, str. 41-51. Selected papers from the E-MRS 2007 Fall Meeting Symposium G: Genetic Algorithms in Materials Science and Engineering - GAMS-2007
- LIN, C.-J. - XU, Y.-J. 2006. A novel genetic reinforcement learning for nonlinear fuzzy control problems. *Neurocomputing* Volume 69, Issues 16-18, s. 2078-2089 *Brain Inspired Cognitive Systems*
- LIU, H. - XU, Z. - ABRAHAM, A. 2005. Hybrid Fuzzy-Genetic Algorithm Approach for Crew Grouping. *Proc of the 5th Int Cof on Intelligent Systems Design and Applications, Wroclaw*, s. 332-337
- MAN, K. F. - TANG, K. S. - KWONG, S. 2001. *Genetic Algorithms*, str. 155-172, Springer
- MASHINCHI, M. R. - SELAMAT, A. 2009. An improvement on genetic-based learning method for fuzzy artificial neural networks. *Applied Soft Computing* Volume 9, Issue 4, str. 1208-1216
- MATOUŠEK, R. 2001. Realisation of Fuzzy-Adaptive Genetic Algorithms in a Matlab Environment. Institute of Automation and Computer Science, Brno University of Technology.
- MELIN, P. - CASTILLO, O.. 2003. Adaptive intelligent control of aircraft systems with a hybrid approach combining neural networks, fuzzy logic and fractal theory. *Applied Soft Computing* Volume 3, Issue 4, str. 353-362 *Soft Computing for Control of Non-Linear Dynamical Systems*
- MICHALEWICZ, Z. 1996. *Genetic Algorithms+Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag v (Sekaj 2005)
- MITCHELL, M. 1998. *An Introduction to Genetic Algorithms*, The MIT Press v (Sekaj 2005)

- MOGHADDAMNIA, A., GOUSHEH, M. G., PIRI, J., AMIN, S., HAN, D., 2009: Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques. *Advances in Water Resources* Volume 32, Issue 1, str. 88-97
- NAUCK, D. - KLAWONN, F. - KRUSE, R. 1997. *Foundations of Neuro-Fuzzy Systems*. John Wiley, Chichester, s. 305
- NEGNEVITSKY, M. 2005. *Artificial Intelligence*. Pearson Education Limited, s. 259 - 299
- NOVÁK, V. 1986. *Fuzzy množiny a jejich aplikace*. 1. vyd. Praha: SNTL, 278 s.
- OH, S.-K. - PEDRYCZ, W. - ROH, S.-B. 2009. Hybrid fuzzy set-based polynomial neural networks and their development with the aid of genetic optimization and information granulation. *Applied Soft Computing* Volume 9, Issue 3, str. 1068-1089
- PAULUSOVÁ, J. - KOZÁK, Š. 2005. Fuzzy-neuro predictive controller tuned by genetic algorithms. *AT&P journal PLUS7 2005. 7/2005 – Umelá inteligencia v praxi*
- SAEMI, M. - AHMADI, M. - VARJANI, A. Y. 2007. Design of neural networks using genetic algorithm for the permeability estimation of the reservoir. *In Journal of Petroleum Science and Engineering* 59, s. 97 – 105
- SAHOO, G. B. - RAY, C. 2006. Predicting flux decline in crossflow membranes using artificial neural networks and genetic algorithms. *In Journal of Membrane Science* 283, str. 147-157.
- SEKAJ, I. 1998a. Zdrojový kód funkcie selbest v prostredí Matlab. 12/1998. Bratislava: FEI STU. Interné materiály.
- SEKAJ, I. 1998b. Zdrojový kód funkcie shake v prostredí Matlab. 12/1998. Bratislava: FEI STU. Interné materiály.
- SEKAJ, I. 2000a. Zdrojový kód funkcie selrand v prostredí Matlab. 5/2000. Bratislava: FEI STU. Interné materiály.
- SEKAJ, I. 2000b. Zdrojový kód funkcie selsus v prostredí Matlab. 5/2000. Bratislava: FEI STU. Interné materiály.
- SEKAJ, I. 2000c. Zdrojový kód funkcie selwrul v prostredí Matlab. 5/2000. Bratislava: FEI STU. Interné materiály.
- SEKAJ, I. 2002. Zdrojový kód funkcie seltourn v prostredí Matlab. 8/2002. Bratislava: FEI STU. Interné materiály.
- SEKAJ, I. 2004. Prednášky z predmetu Software riadiacich systémov. Bratislava: FEI STU. Interné materiály.
- SEKAJ, I. 2005. *Evolučné výpočty a ich využitie v praxi*, vydavat. IRIS, ISBN 80-89018-87-4, 157 s.
- SEKAJ, I. 2006. Prednášky z predmetu Fuzzy a neurónové systémy. Bratislava: FEI STU. Interné materiály.
- SETNES, M. - ROUBOS, H. 2000. GA-fuzzy modeling and classification: complexity and performance. *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, 8.5: 509-522.
- SCHMITZ, G. P. J. - ALDRICH, C. 1999. Combinatorial evolution of regression nodes in feedforward neural networks. *In Neural Networks* 12, str. 175-189. Setnes, M., Roubos, H., 2000: GA-fuzzy modeling and classification: complexity and performance. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*
- SHOOREHDELI, M. A. - TESHNEHLAB, M. - SEDIGH, A. K. - KHANESAR, M. A. 2009. Identification using ANFIS with intelligent hybrid stable learning algorithm approaches and stability analysis of training methods. *Applied Soft Computing* Volume 9, Issue 2, str. 833-850
- SRINIVASU, D. S. - BABU, N. R. 2008. A neuro-genetic approach for selection of process parameters in abrasive waterjet cutting considering variation in diameter of focusing nozzle. *Applied Soft Computing* Volume 8, Issue 1, str. 809-819

- TAHERI, M. - MOHEBBI, A. 2008. Design of artificial neural networks using a genetic algorithm to predict collection efficiency in venturi scrubbers. In *Journal of Hazardous Materials* 157, s. 122-129.
- TANG, A. M. - QUEK, C. - NG, G. S. 2005. GA-TSKfnn: Parameters tuning of fuzzy neural network using genetic algorithms. *Expert Systems with Applications* Volume 29, Issue 4, str. 769-781
- THANGAVEL, S. - PALANISAMY, V. - DURAISWAMY, K. 2008. Genetic based sensorless hybrid intelligent controller for strip loop formation control between inter-stands in hot steel rolling mills. Volume 47, Issue 2, str. 179-188
- THE MATHWORKS. Fuzzy Toolbox, User's Guide, documentation on CD
- TURKMEN, I. - GUNEY, K. – 2008. Genetic tracker with adaptive neuro-fuzzy inference system for multiple target tracking. *Expert Systems with Applications* Volume 35, Issue 4, str. 1657-1667
- VERMA, B. - ZAKOS, J. 2001. A Computer-Aided Diagnosis System for Digital Mammograms Based on Fuzzy-Neural and Feature Extraction Techniques. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 5, No. 1.
- WATTS, M. - KASABOV, N. 1998. Genetic algorithms for the design of fuzzy neural networks. In *Proc. of ICONIP'98, Kitakyushu*.
- WEINGAERTNER, D. - TATAI, V. K. - GUDWIN, R. R. - VON ZUBEN, F. 2002. Hierarchical Evolution of Heterogeneous Neural Networks. *wcci*, vol. 2, pp.1775-1780, *Computational Intelligence, WCCI. Proceedings of the 2002 World on Congress on*
- WHITLEY, D. 1995. Genetic Algorithms and Neural Networks. In J. Periaux and G. Winter, editors, *Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science*
- YU, S. - GUO, X. - ZHU, K. - DU, J. 2010. A neuro-fuzzy GA-BP method of seismic reservoir fuzzy rules extraction. *Expert Systems with Applications* Volume 37, Issue 3, 15, str. 2037-2042
- ZENG, X.-J. - KEANE, J. A. 2006. Approximation Capabilities of Hierarchical Hybrid Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part A: Systems and Humans*, Vol. 36, No. 5.
- ZVADA, M. Adaptívny fuzzy regulátor. <http://neuron.tuke.sk/> [online]. 19. mája 2003. [cit. 2016-07-14]. Dostupné na internete: <<http://neuron.tuke.sk/zvada/statnice/III/07/index.html>>.

Publikácie autora

- DIDEKOVÁ, Z. - KAJAN, S. 2009a. Applications of Intelligent Hybrid Systems in Matlab. In *Technical Computing Prague 2009 : 17th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 19.11.2009*. Prague : Humusoft, Ltd., 2009, s.CD-Rom. ISBN 978-80-7080-733-0.
- DIDEKOVÁ, Z. - KAJAN, S. 2009b. Neural Control of Non-Linear Processes Designed by Genetic Algorithms. In *ELITECH '09 : 11th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 25.5.2009*. Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009, s.CD-Rom. ISBN 978-80-227-3091-4.
- DIDEKOVÁ, Z. - KAJAN, S. 2009c. Neural Control of Non-Linear Processes Designed by Genetic Algorithms. In *Posterus [elektronický zdroj]*. Roč. 2, č. 10 (2009), s.web-page. ISSN 1338-0087.
- DIDEKOVÁ, Z. - KAJAN, S. 2010. Riadenie nelineárnych systémov pomocou neurónových sietí optimalizovaných genetickými algoritmi. In *Kybernetika a informatika 2010 : Medzinárodná konferencia SSKI SAV, Vyšná Boca, SR, 10.-13. 2. 2010*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2010, s.CD-Rom. ISBN 978-80-227-3241-3.
- DIDEKOVÁ, Z. - KAJAN, S. 2011. Adaptive PID Controller Design Base on Genetic Algorithms and Neural Networks. In *ELITECH '11 : 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011*. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2011, s.1-6. ISBN 978-80-227-3500-1.
- DIDEKOVÁ, Z. - KAJAN, S. - KOZÁK, Š. 2016. Fuzzy non-linear system modeling and control. In *SVCS 2016 : 13th International symposium on stability, vibration, and control of systems*.

- Budapest, Hungary. June 16-18, 2016. Budapest: University of Technology and Economics, 2016, [7] s.
- DIDEKOVÁ, Z. - KOZÁK, Š. 2008. Aplikácia fuzzy algoritmov riadenia v prostredí Matlab-Simulink. In *Technical Computing Prague 2008 : 16th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 11.11.2008*. Praha : Humusoft s.r.o, 2008, s.CD-Rom. ISBN 978-80-7080-692-0.
- DIDEKOVÁ, Z. - KOZÁK, Š. 2009. Modeling and Control of Non-Linear Systems Using Soft Computing. In *International Review of Automatic Control*. Vol. 2, No. 4 (2009), s.366-371. ISSN 1974-6059.
- DIDEKOVÁ, Z. - KOZÁK, Š. 2010. Modelovanie a riadenie nelineárnych systémov pomocou Fuzzy Hammersteinovho modelu. In *AT&P Journal*. Roč. 17, č. 6 (2010), s.On-line. ISSN 1335-2237.
- DIDEKOVÁ, Z. - KOZÁK, Š. 2011. Modeling and Control of Non-Linear Systems using Fuzzy-Neuro Approaches. In *PEIT '011. New Paradigms in Electronics & Information Technologies : 1st International Conference. Alexandria, Egypt, October 9-12, 2011*. Cairo : ERI, 2011, s.CD-Rom.
- DIDEKOVÁ, Z. - MIKOVIČOVÁ, B. 2012. Classification of Radio Communication Signals Using Fuzzy Logic. In *World Academy of Science, Engineering and Technology*. Iss. 64 (2012), s.1187-1191. ISSN 2010-376X.
- DIDEKOVÁ, Z. - MIKOVIČOVÁ, B. 2013. Fuzzy Logic in Classification of Radio Communication Signals. In *Journal of Communication and Computer*. Vol. 10, Iss. 2 (2013), s.207-213. ISSN 1548-7709.
- KAJAN, S. et al. 2013. Neural Genetic Control Algorithm of Nonlinear Systems. In *International Review of Automatic Control*. Vol. 6, No. 2 (2013), s.206-210. ISSN 1974-6059. **(Scopus)**
- KAJAN, S. - LAJTMAN, M. - DIDEKOVÁ, Z. 2011. Cluster Analysis Using Self-Organizing Maps. In *ATP Journal plus*. č. 1 : Systémy automatického riadenia (2011), s.22-25. ISSN 1336-5010.
- KAJAN, S. - SEKAJ, I. - DIDEKOVÁ, Z. 2009a. Design of the Neural Model Structure Based on Genetic Algorithms. In *Process Control 2009 : Proceedings of the 17th International Conference on Process Control 2009. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 9.-12.6.2009*. Bratislava : STU v Bratislave, 2009, s.273-276. ISBN 978-80-227-3081-5.
- KAJAN, S. - SEKAJ, I. - DIDEKOVÁ, Z. 2009b. Neuro-Predictive Controller Design Based on Genetic Algorithms. In *AT&P Journal Plus*. Č. 1: Inteligentné pohybové systémy (2009), s.17-20. ISSN 1336-5010.
- SEKAJ, I. et al. 2008. Neuro-Predictive Control Design Based on Genetic Algorithms. In *Technical Computing Prague 2008 : 16th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 11.11.2008*. Praha : Humusoft s.r.o, 2008, s.CD-Rom. ISBN 978-80-7080-692-0.
- SEKAJ, I. - KAJAN, S. - DIDEKOVÁ, Z. 2012. Neural Controller for Nonlinear System Designed by Genetic Algorithm. In *MENDEL 2012 : 18th International Conference on Soft Computing. June 27-29, 2012, Brno, Czech Republic*. Brno : University of Technology, 2012, s.268-274. ISBN 978-80-214-4540-6. **(Scopus)**
- ZELENKA, J. - BUDINSKÁ, I. - DIDEKOVÁ, Z. 2012. A Combination of Heuristic and Non-Heuristic Approaches for Modified Vehicle Routing Problem. In *LINDI 2012 : 4th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics. Smolenice, Slovakia, September 5-7, 2012*. Piscataway : IEEE, 2012, s.107-112. ISBN 978-146734519-4. **(Web of Science, Scopus)**
- ZELENKA, J. - DIDEKOVÁ, Z. 2013. Cost Balancing Act of Vehicle Number to Solve the Vehicle Routing Problem with Time Windows. In *INES 2013 : IEEE 17th International Conference on Intelligent Engineering Systems, June 19-21, 2013, Costa Rica*. Piscataway : IEEE, 2013, s. 293-299. ISBN 978-1-4799-0828-8. **(Scopus)**