

Fuzzyfikácia dynamického black-box systému

Fuzzyfication of Dynamic Black-Box System

Daniela Perduková¹, Pavol Fedor²

¹daniela.perdukova@tuke.sk, ²pavol.fedor@tuke.sk

^{1,2}Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice, Slovenská Republika

Abstrakt— Príspevok sa zaoberá náhradou dynamického black-box systému definovaného databázou zodpovedajúcich vstupov a výstupov pomocou ekvivalentného fuzzy systému, ktorý má podobné správanie sa z hľadiska vstupov a výstupov. Jadrom článku je testovanie databázy údajov DS z hľadiska ich vzájomnej konzistencie, ktoré umožňuje vyhnúť sa nerealizovateľným pokusom o túto náhradu. Princíp metódy je vysvetlený na jednoduché sústave 2. rádu a overený simuláciou na modeli asynchrónneho motora, ktorý predstavuje sústavu 5-tich nelineárnych diferenciálnych rovníc.

KLúčové slová— *black-box dynamický systém, fuzzy modelovanie, databáza údajov, konzistencia, asynchrónny motor*

Abstract— The article deals with the substitution of a dynamic system defined by a corresponding database of Inputs/Outputs using an equivalent fuzzy system that has a similar behavior in terms of inputs and outputs. The main aim of the article is to test the dynamic system database in terms of their mutual consistency, which makes it possible to avoid unrealistic attempts to substitute it with fuzzy systems. The principle of the method is explained on a simple 2nd order system and verified by simulation on an asynchronous motor model, which presents the system of 5 non-linear differential equations.

Keywords— *black-box dynamic system, fuzzy modeling, database, consistency asynchronous motor*

I. ÚVOD

V poslednej dobe sa často vyskytujú v odbornej literatúre príspevky, obsahom ktorých je aplikácia teórie fuzzy množín na riešenie rôznych typov problémov, či už technických, ekonomických, informačných, atď. Hoci bol „fuzzy“ prístup pôvodne navrhovaný skôr pre oblasti, v ktorých systémy popisujeme z rôznych dôvodov s určitým stupňom neurčitosti, väčšina aplikácií je z technických oblastí, kde sú sústavy pomerne dobre popísané diferenciálnymi rovnicami a prevažne aj regulovateľné klasickými PID regulátormi. Pri modelovaní a návrhu týchto systémov pomocou fuzzy množín sa nevychádza (väčšinou) z ich lingvistického popisu, ale z nameranej databázy údajov o ich vstupoch a výstupoch, ktorú sa snažíme pretransformovať na zodpovedajúci fuzzy systém (FS). Pretože táto úloha je nejednoznačná (v tom zmysle, že daný systém môžeme z hľadiska vstupov a výstupov popísať rôznymi fuzzy systémami), vzniká otázka, či je možné a za akých podmienok vytvoriť z danej databázy údajov o dynamickom black-box systéme jej fuzzy ekvivalent.

V článku je ukázané, ako testovať a prípadne upravovať databázu údajov o dynamickom systéme, aby ho bolo možné

popísať zodpovedajúcim fuzzy systémom. Takýto fuzzy model systému je potom možné využiť aj pre oblasť inteligentných a moderných metód riadenia zložitých systémov z oblasti elektrotechniky [1], energetiky [2-3] a mechatroniky [4-5].

II. POPIS PROBLÉMU

Predpokladáme, že dynamický systém je popísaný databázou údajov, ktorá množine vstupných vektorov $\underline{x}_i$ priraďuje zodpovedajúce hodnoty y_i .

Takýto systém chceme nahradiť fuzzy systémom, ktorý bude mať z hľadiska vstupov a výstupov chovanie sa blízke dynamickému systému a bude realizovaný pomocou bežne používanej množiny IF – THEN pravidiel:

AK x_1 je ... **A** x_2 je ... **A** x_n je ... **POTOM** y je ...

Dá sa ukázať, že takýmto fuzzy systémom môžeme s dostatočnou presnosťou aproximovať ľubovoľnú statickú spojitú funkciu pomocou konečnej množiny fuzzy premených, pravidiel a hodnôt [6-8].

Základným predpokladom, aby táto náhrada dynamického systému pomocou fuzzy systému bola možná, je **konzistencia** údajov v databáze. V podstate to znamená, že pre „veľmi blízke“ susedné vstupné body $\underline{x}_i$ nesmú byť „veľmi rozdielne“ výstupy y_i .

Označme za **susedov** také dve položky x_i , x_j z databázy údajov, ktorých Euklidovská vzdialenosť v n -rozmernom stavovom priestore

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad i = 1, \dots, i_{\max}, j = 1, \dots, i_{\max} \quad (1)$$

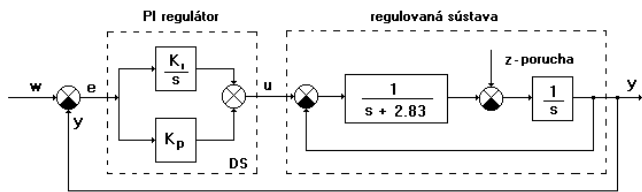
je menšia ako definovaná blízkosť d_b . Potom môžeme nekonzistenciu n_{ij} dvoch **susedov** kvantitatívne vyjadriť napr. absolútnou hodnotou z rozdielu ich výstupov

$$n_{ij} = \text{abs}(y_i - y_j) \quad (2)$$

Databáza údajov o DS je konzistentná so stupňom $n_{ij\max}$, ak pre každú položku x_i databázy platí, že nekonzistencia n_{ij} od všetkých jej susedov je menšia než $n_{ij\max}$, t.j.

$$\text{Ak } d_{ij} \leq d_b, \text{ potom } n_{ij} \leq n_{ij\max} \quad \text{pre } i=1, \dots, i_{\max} \quad j=1, \dots, n \quad (3)$$

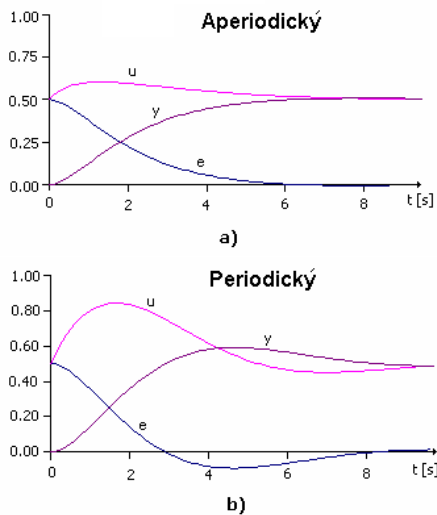
Príklad 1: Uvažujme uzavretý regulačný systém podľa Obr. 1



Obr. 1. Štruktúra uzavretého regulačného systému

Pokúsme sa PI regulátor (dynamickej systém) nahradiť odpovedajúcim fuzzy systémom z hľadiska odozvy systému na skok $w=0.5$. Uvažujme dva prípady:

1. pre $K_I=0.5$, $K_P=1$ dostaneme aperiodickú odozvu podľa Obr.2a;
2. pre $K_I=2$, $K_P=1.5$ dostaneme periodickú tlmenú odozvu podľa Obr.2b.


 Obr. 2. Odozvy regulačného obvodu pre rôzne K_I , K_P

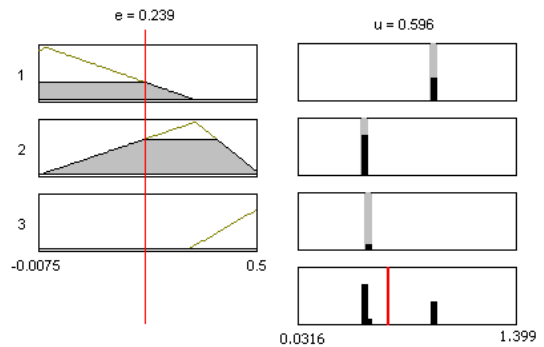
Zoberme do databázy údajov vzorky z hodnôt e (regulačná odchýlka) a u (akčný zásah, výstup z regulátora) v časových intervaloch $T=1s$. Analýzu údajov pre obidva prípady a pre zvolené d_b môžeme urobiť z Tab.1.

Aperiodický				
$d_b = 0.01$				
i	e	u	bcet sused	nijmax
1	0,500	0,500	1	0,000
2	0,376	0,601	1	0,000
3	0,222	0,595	1	0,000
4	0,117	0,572	1	0,000
5	0,053	0,550	1	0,000
6	0,019	0,533	1	0,000
7	0,002	0,520	5	0,019
8	-0,006	0,512	5	0,011
9	-0,008	0,506	5	0,014
10	-0,007	0,503	5	0,017
11	-0,006	0,501	5	0,019

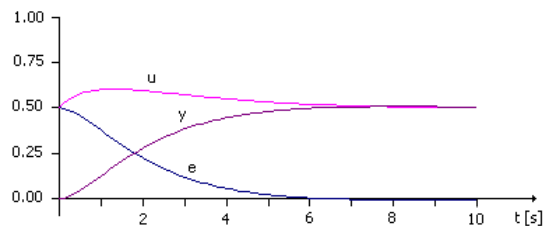
Periodický				
$d_b = 0.01$				
i	e	u	Pocet susedo	nijmax
1	0,500	0,500	1	0
2	0,356	0,800	1	0
3	0,142	0,834	1	0
4	-0,011	0,740	2	0,279803
5	-0,082	0,616	2	0,097598
6	-0,090	0,518	2	0,097598
7	-0,064	0,465	1	0
8	-0,031	0,451	1	0
9	-0,005	0,460	2	0,279803
10	0,009	0,477	2	0,015889
11	0,013	0,493	2	0,015889

Tab. 1 Tabuľky pre analýzu údajov periodickej a aperiodickej odozvy zvoleného DS

Vidíme, že zatiaľ čo databáza z Tab.1 pre aperiodickú odozvu dynamickej systému je konzistentná, databáza pre periodickú odozvu vykazuje veľkú nekonzistenciu pre položku $i=4$ a $i=9$. Pre aperiodický dynamickej systém vieme navrhnuť fuzzy systém typu Sugeno, napríklad podľa Obr.3, pomocou ktorého dostaneme odozvu podľa Obr.4.



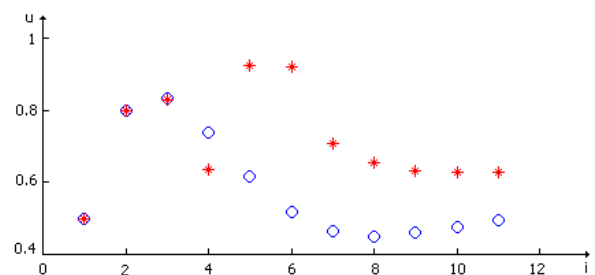
Obr. 3. Príklad fuzzy regulátora pre dynamickej sústavu z Obr.1



Obr. 4. Odozva regulovanej sústavy s náhradným fuzzy systémom

Poznámka: Simulácia príkladov aj návrh fuzzy systému bol robený pomocou programového balíka MATLAB® a nástrojov Fuzzy Toolbox.

Pre periodickú odozvu dynamickej systému na základe údajov za Tab.1 nie je možné nájsť kvalitnú náhradu odpovedajúcim fuzzy systémom tak, ako je to ukázané na Obr. 5, kde sú testované výsledky učenia sa fuzzy systému po 1000 krokoch pomocou programu Anfisedit, pričom v predchádzajúcom prípade (pri aperiodickej odozve dynamickej systému) stačilo pre návrh fuzzy systému 100 krokov. Pri procese učenia sa totiž vzorky 4 a 9 z Tab.1 požadujú výrazne rozdielne výstupy fuzzy systému (t.j. sú nekonzistentné).

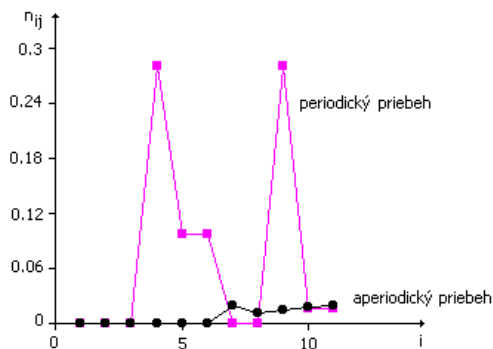


Obr. 5. Test návrhu fuzzy systému na základe databázy údajov z Tab.1

Na Obr.6 je ukázané grafické porovnanie konzistencií pre obidva testované prípady a pre $d_b=0.01$.

Pri zbere údajov o dynamickej systéme do databázy sa v nej môžu vyskytnúť položky (body), ktoré sú si v stavovom priestore veľmi blízke. Napríklad v Tab.1 body 7 až 11 majú

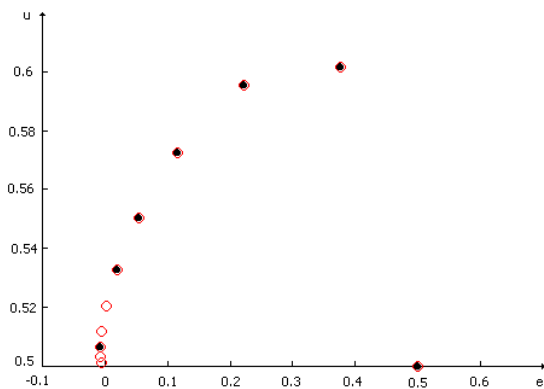
až 5 susedov a ich výstupy u sa veľmi nelišia. To znamená, že takáto susediaca skupina bodov (zhluk) v $(n+1)$ -rozmernom stavovom priestore obsahuje redundantné informácie, pričom pri využití databázy pre návrh zodpovedajúceho fuzzy systému počet položiek môže podstatne predlžovať výpočtovú náročnosť návrhu.



Obr. 6. Porovnanie nekonzistencie aperiodického a periodického priebehu

Z toho dôvodu je vhodné v takomto prípade urobiť tzv. *redukciiu databázy*. Z viacerých známych metód je možné použiť napr. metódu určovania prirodzených zhlukov podľa [9-10], ktorá je zabudovaná aj v programovom balíku MATLAB pod názvom „subtractive clustering“.

Na Obr. 7 je ukázaný príklad, ako sa počet 11 bodov zredukoval po použití tejto metódy na 7, t.j. databáza údajov sa zredukovala na 63% bez podstatnej straty informácie.



Obr. 7. Redukcia databázy údajov pomocou vyhľadávania zhlukov

Z uvedeného rozboru vidíme, že podľa počtu susedov a nekonzistencie vieme posúdiť, či zvolená databáza principiálne umožňuje nahradiť daný dynamický systém pomocou fuzzy systému, resp. z tejto databázy môžeme odstrániť redundantnú informáciu.

III. POSTUP PRI NÁHRADE DYNAMICKÉHO SYSTÉMU POMOCOU FUZZY SYSTÉMU

Algoritmus testovania databázy údajov pre náhradu dynamického systému pomocou fuzzy systému môžeme rozvrhnúť do nasledujúcich krokov:

1. Pre danú databázu údajov vygenerujeme graf „počtu susedov a konzistencie“ podľa rovníc (1) až (3). Je veľmi výhodné, ak sú jednotlivé databázové položky normované do jednotkového rozsahu, pretože sa tým zjednodušujú úvahy o veľkosti d_b , t.j. o vzdialenosti, v rámci ktorej sú dve položky považované ešte za susedov. Táto vzdialenosť sa po-

tom môže zvoliť napríklad ako percentuálna časť maximálneho rozsahu, v ktorom sa jednotlivé súradnice položiek nachádzajú.

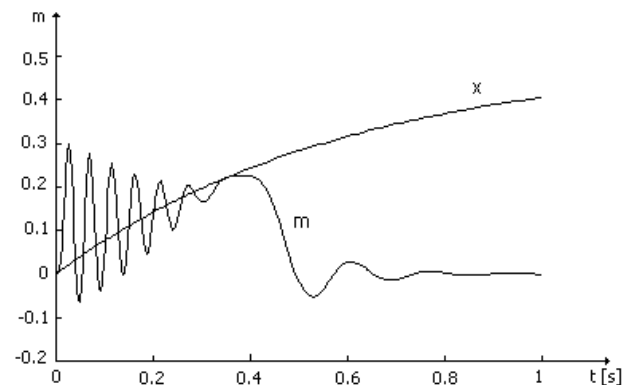
2. Podľa počtu susedov a ich vzájomnej konzistencie rozhodneme, či databáza údajov obsahuje nadbytočné informácie a či je potrebné ju redukovať. Redukovať databázu je možné iba u takých susedov, ktorí sú konzistentní v rámci zvolenej miery nekonzistencie.
3. Rozhodneme, či konzistencia údajov databázy je v zvolenom pásme (napríklad v rámci percentuálnej časti rozsahu). V prípade, že databáza je konzistentná, môžeme ju použiť pre náhradu dynamického systému pomocou fuzzy systému. Ak je databáza údajov nekonzistentná, môžeme sa pokúsiť vylúčiť niektoré jej nekonzistentné položky, ktoré mohli vzniknúť napríklad chybným meraním. Väčšinou však musíme nekonzistentnú databázu nahradiť novou databázou údajov.

Pri nekonzistentnej databáze údajov máme v zásade dve možnosti:

- rozšíriť počet vstupov do FS o ďalšie nezávislé vstupy a tak získať konzistentnú databázu;
- zásadne zmeniť počet a typ sledovaných vstupných údajov do FS.

Celý algoritmus je ďalej konkrétne ukázaný na návrhu fuzzy modelu trojfázového asynchrónneho motora.

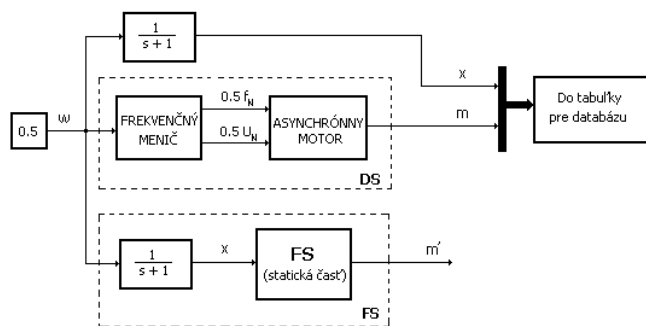
Príklad 2: Trojfázový asynchrónny motor je dynamický systém, ktorý za určitých predpokladov môžeme popísať sústavou piatich nelineárnych diferenciálnych rovníc, napríklad podľa [11]. Tento dynamický systém nahradíme ekvivalentným fuzzy systémom pre prípad priameho pripojenia asynchrónneho motora na sieť s polovičným nominálnym napätím a polovičnou nominálnou frekvenciou z hľadiska dynamického momentu motora. Možná dynamická odozva momentu vybraného konkrétneho motora (po znormovaní do rozsahu $< 1, 1 >$ je ukázaná na Obr. 8.



Obr. 8. Dynamika momentu m trojfázového asynchrónneho motora

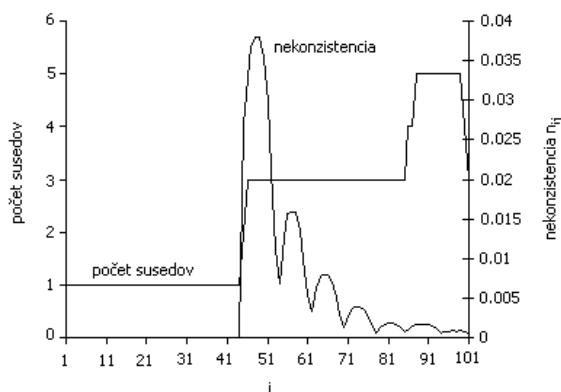
Pokúsme sa nahradiť trojfázový asynchrónny motor pomocou fuzzy systému podľa Obr.9. Fuzzy systém je rozdelený na samotnú statickú nelineárnu časť, vytvorenú pomocou modelu typu Sugeno a dynamickú časť, ktorú predstavuje zotrvačnosť 1. rádu s výstupom x .

Do tabuľky pre databázu odoberme vzorky z veličín x , m v ekvidistančných časových okamihoch s dobou vzorkovania $T=0.01s$.



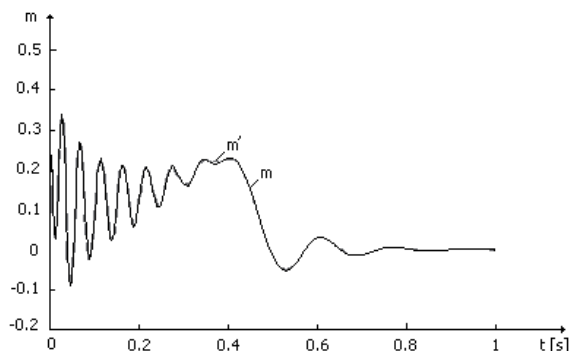
Obr. 9. Bloková schéma náhrady dynamického systému fuzzy systémom

Maximálny rozsah vstupnej veličiny x je 0.406. Zvoľme teda kritérium pre susedstvo dvoch vstupov $d_b = 0.004$, čo je približne 1% rozsahu. Počet susedov a nekonzistenciu údajov databázy pre takéto predpoklady zobrazuje graf na Obr.10.



Obr. 10. Graf konzistencie databázy údajov asynchrónneho motora

Z Obr.10 vidíme, že počet susedov sa zvyšuje pre hodnoty x na konci databázy vzoriek, pričom ich nekonzistencia je dostatočne nízka, čo by umožňovalo túto databázu (ktorá má 100 vzoriek) redukovať. Pomocou funkcie „findcluster“ programu MATLAB môžeme napríklad redukovať túto databázu na cca 60 položiek bez podstatnej straty presnosti. Na základe tejto redukovanej databázy nájdeme potom funkciou „anfisedit“ zodpovedajúci fuzzy systém, ktorý by bol v tomto prípade typu Sugeno a obsahoval by 14 pravidiel. Porovnanie dynamiky momentu pôvodného dynamického systému (asynchrónneho motora) a jeho náhrady pomocou fuzzy systému je ukázané na Obr.11.



Obr. 11. Porovnanie kvality náhrady asynchrónneho motora pomocou zodpovedajúceho fuzzy systému

Mnohokrát sa používa diskretná náhrada spojitého dynamického systému, pri ktorej sa z predchádzajúcich vzoriek dynamického priebehu nastavuje okamžitá hodnota výstupu fuzzy systému, napríklad podľa vzťahu

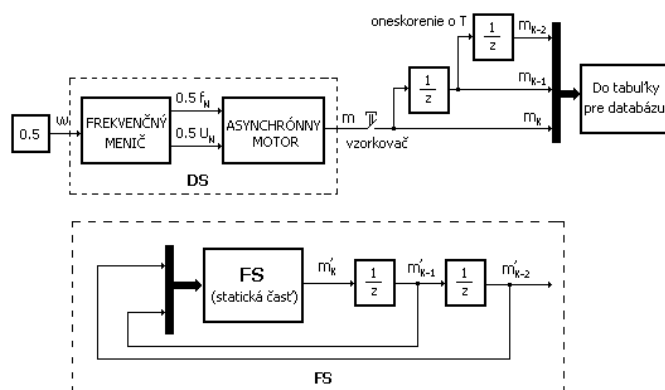
$$y_k = f(y_{k-1}, y_{k-2}, \dots) \quad (4)$$

Nelineárna funkcia f sa nahradzuje pomocou zodpovedajúceho fuzzy systému.

Predpokladajme pre náš prípad, že z dvoch predchádzajúcich vzoriek dynamického priebehu momentu motora podľa Obr.8 budeme určovať hodnotu momentu v nasledujúcom kroku, pričom zvolíme opäť dobu vzorkovania $T = 0.01$ s. Podľa Obr.12 bude položka databázy obsahovať dva vstupy m_{k-2} , m_{k-1} a jeden výstup m_k . Fuzzy systém potom bude mať tvar

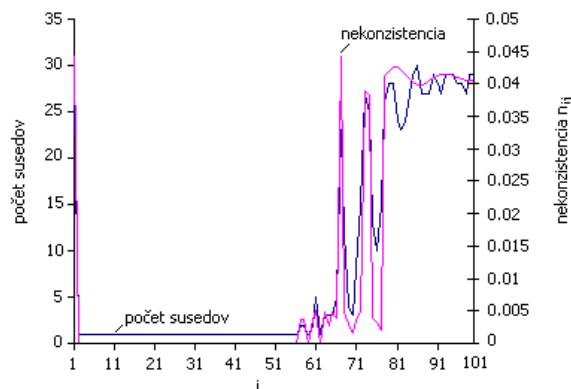
$$m'_k = f(m'_{k-1}, m'_{k-2}) \quad (5)$$

Maximálny rozsah vstupov databázy je 0.29, zvolíme teda $d_b = 0.003$, čo je opäť približne 1% z rozsahu vstupných údajov.



Obr. 12. Bloková schéma náhrady dynamického systému fuzzy systémom

Graf počtu susedov a nekonzistencie je uvedený na Obr.13.

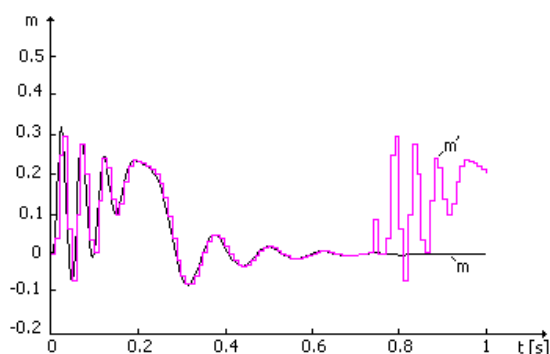


Obr. 13. Graf konzistencie databázy asynchrónneho motora

Z tohto obrázku vidíme, že databáza obsahuje veľký počet susedov pre hodnoty vstupov blízke nule (ustálený stav) a tieto položky vykazujú relatívne vysokú nekonzistenciu.

Obrázok 14 ukazuje porovnanie pôvodného priebehu momentu asynchrónneho motora m a jeho náhrady m' . Z Obr.14 je zrejmé, že náhrada dynamického systému pomocou fuzzy

systému je vhodná v tomto prípade pre konzistentné položky databázy.



Obr. 14. Porovnanie náhrady momentu m asynchrónneho motora s m'

Z hodnôt vstupov blízkyh ustálenému stavu (nule) náhradný fuzzy systém opakovane začína generovať moment, lebo v databáze nie je informácia o jednorázovosti tohto deja. Túto databázu by bolo nutné doplniť o ďalší vstup, ktorý by mal jednorázový charakter a umožnil by rozlíšiť nulové vstupy databázy pred a po dození prechodového deja momentu m .

IV. ZÁVER

Každý, kto sa pokúsil nahradiť skutočne neznámy dynamický systém, popísaný iba databázou zodpovedajúcich vstupov a výstupov pomocou ekvivalentného fuzzy systému má určite skúsenosť, že pri návrhu proces učenia sa fuzzy systému neprebíhal podľa očakávania a dosiahnuté výsledky neboli dostatočne kvalitné alebo vôbec nevyhovovali zadaniu úlohy. Vzhľadom na nejednoznačnosť úlohy navrhovateľ nevedel, či je problém v jeho postupe (napr. v nevhodnej fuzzyfikácii vstupov a výstupov, počte a tvare pravidiel ...) alebo v databáze údajov, nazbieraných z dynamického systému. V tomto príspevku je ukázané, ako je možné pomocou testovania konzistencie údajov v databáze posúdiť, či je principiálne možná náhrada uvažovaného dynamického systému pomocou fuzzy systému. Tento postup je overený simuláciou niekoľkých prípadov pomocou programového balíka MATLAB. Uvedenú metodiku zostavovania fuzzy modelov dynamických systémov je možné využiť aj pre úlohy inteligentného riadenia zložitých dynamických sústav v elektrotechnike, energetike a mechatronike.

PODAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-16-0206.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] D. Perduková, P. Fedor, "A Model-Based Fuzzy Control of an Induction Motor," in *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, VSB-Technical University of Ostrava, 2014, Vol. 12, Iss. 5, pp. 427-434. ISSN 1336-1376.
- [2] D. Perduková, P. Fedor and R. Olexa, "Modeling a small hydropower plant," *Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2019*, pp. 352-356, 2019.
- [3] H. Koc, D. Knittel, M. D. Mathelin and G. Abba, Robust gain-scheduled control of winding systems, in: *39th IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, 2000. DOI: 10.1109/CDC.2000.912360.

- [4] K. Kiriakidis, Fuzzy model based control of complex plants, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 6(4) (1998), 517-529. DOI: 10.1109/91.728444.
- [5] Z. Song, J. Yi, D. Zhao and X. Li, A computed torque controller for uncertain robotic manipulator systems: Fuzzy approach, *Fuzzy Sets and Systems* 154(2) (2005), 208-226. DOI: 10.1016/j.fss.2005.03.007.
- [6] J. Sjoberg, Q. Zhang, L. Ljung, A. Benveniste, B. Delyon, P. Glorennec, H. Hjalmarsson and A. Juditsky, Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview, *Automatica* 31(12) (1995), 1691-1724. DOI: 10.1016/0005-1098(95)00120-8.
- [7] R. Babuška, *Fuzzy Modeling for Control*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [8] M. Setnes, R. Babuška and H. B. Verbruggen, "Complexity reduction in fuzzy modeling", *IMACS Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 46, pp. 507-516, 1998.
- [9] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 15, pp. 116-13, 1985.
- [10] J. Abonyi, R. Babuska and F. Szeifert, "Fuzzy modeling with multivariate membership functions: gray-box identification and control design", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part B Vol. 31, No. 5, pp. 755-767, 2001.
- [11] J. Vittek, "New trends in electrical drives", *Electrical engineering in practice*. Vol. 13, pp. 8-11, 2003.

D. Perduková získala titul inžiniera v odbore Technická kybernetika na Technickej univerzite v Košiciach v roku 1984. Vedeckú aspirantúru ukončila v roku 1995. V súčasnosti pracuje Od roku 2011 pracuje ako profesorka na Katedre elektrotechniky a mechatroniky TU Košice.

Jej výskumná činnosť je zameraná na vývoj nových riadiacich štruktúr a aplikácie moderných metód riadenia v oblasti elektrických pohonov, na oblasť logického programovania a vizualizáciu technologických procesov.

P. Fedor získal titul inžiniera v odbore Technická kybernetika na Technickej univerzite v Košiciach v roku 1980 a titul Kandidáta vied v roku 1986 na tej istej univerzite. V súčasnosti pracuje ako profesor na Katedre elektrotechniky a mechatroniky TU Košice.

Mnoho praktických skúseností získal pri konkrétnom zavádzaní riadiacich systémov v priemysle. V teoretickej oblasti sú jeho výskumné aktivity zamerané na vývoj nových riadiacich štruktúr a aplikácie moderných metód riadenia v oblasti elektrických pohonov a mnohorozmerových systémov a na oblasť logického riadenia technologických procesov.