

# Fuzzy prístup pre zostavenie modelu jednosmerného pohonu

## A Fuzzy Approach for DC Drive Fuzzy Model Design

Daniela Perduková<sup>1</sup>, Pavol Fedor<sup>2</sup><sup>1</sup>[daniela.perdukova@tuke.sk](mailto:daniela.perdukova@tuke.sk), <sup>2</sup>[pavol.fedor@tuke.sk](mailto:pavol.fedor@tuke.sk)<sup>1,2</sup>Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00, Košice, Slovenská Republika

**Abstrakt**— Článok sa zaoberá metodikou návrhu fuzzy modelu jednosmerného pohonu, ktorý je popísaný iba vstupno-výstupnými reláciami, bez znalostí štruktúry modelovaného systému a jeho parametrov. Na báze nameraných vstupno/výstupných údajov o sústave je zostavený jej fuzzy model, ktorý pokrýva celý priestor možných vstupov pohonu, pričom je zabezpečená principiálna konzistencia nameranej databázy údajov. Vlastnosti navrhnutého fuzzy modelu boli overené číslcovou simuláciou v programe Matlab. Dosiahnuté výsledky potvrdzujú správnosť navrhutej metódy a jej aplikovateľnosť aj na iné typy elektrických pohonov.

**Kľúčové slová**—black-box systém, fuzzy model, jednosmerný pohon, konzistentnosť databázy

**Abstract**— The paper deals with the methodology of designing a complete fuzzy model of a DC drive which is described only with a suitable database of measured input – output values, without the knowledge of the structure of the modelled system and its parameters. On the basis of measured input/output data of the system is constructed its fuzzy model, which covers the entire range of possible drive inputs, while it is ensured the consistency of the measured database. Properties of the proposed fuzzy model have been verified by simulation by means of the MATLAB® programming package. The achieved results confirm the correctness of the proposed method and its applicability to other types of electric drives.

**Keywords**—black-box system, fuzzy model DC drive, database consistency

### I. ÚVOD

V súčasnosti má metodika použitia fuzzy množín v rôznych aplikáciách v oblasti elektrických pohonov stúpajúcu tendenciu. Medzi významné úlohy patrí tvorba zodpovedajúcich modelov jednotlivých typov pohonov. Túto úlohu je možné riešiť za predpokladu analytických znalostí o danom type pohonu, čo však neprináša žiadne výhody v porovnaní s klasickým prístupom modelovania, pričom sa samozrejme nevyužívajú ani podstatné vlastnosti fuzzy systémov. Druhou možnosťou je pokúsiť sa zostaviť model vybraného pohonu iba na základe znalostí o jeho zodpovedajúcich vstupoch a výstupoch bez apriórnej znalosti jeho štruktúry a parametrov. V článku je uvedený práve takýto postup návrhu fuzzy modelu jednosmerného pohonu zostaveného na základe vhodnej databázy nameraných údajov, pričom sa nepredpokladajú žiadne ďalšie znalosti o danom pohone. Navrhovaná metodika je overená simuláciou v programe Matlab.

### II. POPIS PROBLÉMU

Elektrický pohon je dynamický systém, ktorý môžeme vo všeobecnosti popísať v stavovom priestore rovnicami

$$\dot{x} = A(x, t)x + B(x, t)u \quad (1)$$

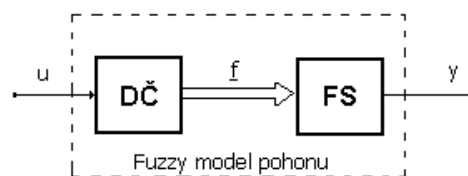
$$y = Cx \quad (2)$$

kde  $x$  je stavový vektor systému,  $u$  je vektor vstupov a  $y$  je vektor výstupov zo systému,  $A$  je matica systému,  $B$  je matica vstupov a  $C$  matica výstupov systému.

Predpokladáme, že sa jedná o systém s jedným vstupom a jedným výstupom. V prípade striedavých pohonov je týmto vstupom statorová frekvencia, pričom predpokladáme, že ďalšie vstupy (napr. statorové napätie alebo prúd) sú vhodne upravené v statickom meniči [1]. Cieľom je na základe nameranej databázy vstupov pohonu a im odpovedajúcich výstupov zostaviť jeho fuzzy model v tvare pravidiel typu

$$\text{AK ... POTOM ...} \quad (3)$$

Fuzzy systém popísaný pravidlami (3) (ďalej len FS) dokáže nahradiť ľubovoľnú spojitú statickú nelineárnu funkciu s dostatočnou presnosťou pomocou konečného počtu pravidiel [2]. Aby bolo možné modelovať pohon ako dynamický systém popísaný rovnicami (1) a (2), je potrebné doplniť FS o dynamickú časť (DČ) [2-3]. Úplný fuzzy model pohonu potom môže vyzeráť tak, ako je to zobrazené na obr. 1. Dynamické časti fuzzy modelov môžu byť samozrejme štruktúrované aj inak ako je to uvedené na tomto obrázku [4-6].



Obr. 1. Navrhovaná štruktúra fuzzy modelu elektrického pohonu

Hlavné požiadavky pri návrhu fuzzy modelu pohonu podľa obr.1 sú:

1. Pre namerané vstupné body databázy údajov (t.j. aj vstupné vektory  $f_i$  do FS) musia byť výstupy  $y_i$  takisto presné.

2. Zabezpečiť úplné pokrytie celého priestoru možných vstupov pohonu pravidlami podľa (3). V opačnom prípade môže nastať prípad, že pri nepokrytom vstupnom stave  $f_i$  výstup FS vykazuje nedefinovanú alebo nesprávnu hodnotu.
3. Zabezpečiť konzistenciu (nerozporupnosť) databázy nameraných údajov, resp. postupnosti vektorov  $f_i$ , ktorá zodpovedá týmto nameraným údajom. Pri nekonzistentnej databáze by „blízkym“ vektorom  $f_i$  zodpovedali rôzne výstupy  $y_i$ . Pretože vektory  $f_i$  sú vlastne vstupy do FS, viedlo by to k rozporupným pravidlám podľa (3) a tým k principiálnej nerealizovateľnosti FS.

Kvalita splnenia týchto požiadaviek závisí hlavne od:

- vhodnej voľby štruktúry dynamickej časti (DČ) modelu elektrického pohonu;
- vhodne zvolených meraní z hľadiska vstupného signálu  $u$  do pohonu;
- vhodného tvaru funkcií príslušnosti pri fuzzyfikácii jednotlivých vstupov do FS.

### III. POSTUP NÁVRHU FUZZY MODELU ELEKTRICKÉHO POHONU

Predpokladajme, že:

- Elektrický pohon má pri skokovom prechode z jednej hodnoty vstupného signálu  $u_i$  na inú hodnotu  $u_{i+1}$  jednoznačnú odozvu výstupnej veličiny  $y_{i+1}(t)$ , ktorá sa ustáli za nejaký konečný čas  $T_{max}$ .
- Pre nejakú konštantnú hodnotu vstupného signálu  $U_i$  sa výstup pohonu ustáli vždy na tej istej hodnote  $Y_i$  za čas menší než  $T_{max}$ . Napr. pre určité napätie kotvy jednosmerného motora sa jeho uhlová rýchlosť ustáli vždy na tej istej hodnote, pre určitú statorovú frekvenciu asynchrónneho motora sa jeho uhlová rýchlosť ustáli vždy na tej istej hodnote a pod.

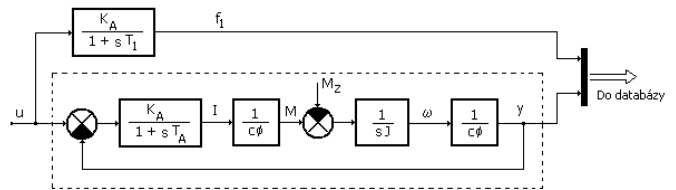
Úplný fuzzy model pohonu dostaneme zjednotením všetkých prechodových trajektórií, ktoré vzniknú pri všetkých prechodoch medzi všetkými možnými hodnotami vstupu do pohonu. Keď rozdelíme rozsah vstupnej veličiny  $u$  na  $n$  úrovní, budeme potrebovať zmerať a potom modelovať  $n(n-1)$  trajektórií.

#### A. Modelovanie jednotlivých trajektórie

Trajektória, ktorá popisuje prechod z jedného ustáleného stavu do druhého pri skokovej zmene vstupu  $u$  je množina za sebou nasledujúcich hodnôt výstupu  $y$  v čase. Aby sme jednoznačne rozlíšili tieto časové okamihy a nemuseli merať absolútny čas, transformujeme vstup  $u$  cez blok zotrvačnosti 1. rádu s jednotkovým zosilnením na funkciu  $f_1$ . Databázu údajov potom tvoria body  $\langle f_{1i}, z_i \rangle$  namerané v časových okamihoch  $t_i$ . Aby sme redukovali počet potrebných fuzzy pravidiel pre FS, vyberáme z databázy len niekoľko centrálnych (typických) bodov, čo je možné urobiť buď na základe grafického priebehu trajektórie v čase alebo niektorou zo známych matematických metód (napr. clustering). Tieto body budú tvoriť vrcholy (tzv. jadrá) jednotlivých funkcií príslušnosti, ktorými fuzzyfikujeme vstupnú funkciu  $f_1$  do FS. Nosiče jednotlivých funkcií príslušnosti nesmú mať väčšiu šírku ako je vzdialenosť k najbližšiemu susedovi (vrchol) z každej strany príslušného jadra, pretože inak by v danom vrchole nemusela byť hodnota

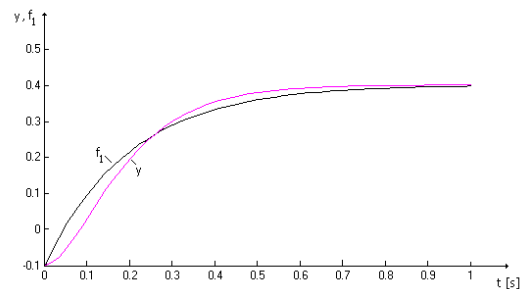
výstupu  $y$  zhodná s nameranou hodnotou v danom vrchole, čo je v rozpore s požiadavkou č.1 uvedenej v Kapitole II. Nosiče funkcií príslušnosti pre susedné vrcholy sa musia prekrývať, lebo inak by nepokryli celý rozsah funkcie  $f_1$ , čo je v rozpore s požiadavkou č.2 uvedenej podobne v Kapitole II.

*Príklad 1:* Zostavme model jednosmerného cudzobudeného motora pre skok vstupu z hodnoty  $u = 0$  na hodnotu  $u = 0.5$ . Databázu údajov vytvoríme meraním podľa obr. 2 z hodnôt  $f_1$  a  $y$  v konštantných časových okamihoch.

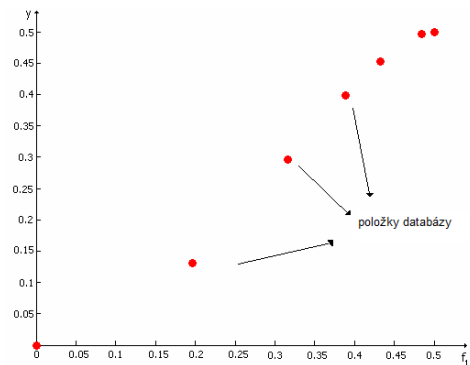


Obr. 2. Zber údajov do databázy pre vytvorenie fuzzy modelu

Časový priebeh  $f_1$  a  $y$  je ukázaný na obr. 3, vybrané dvojice bodov popisujúcich statickú časť fuzzy modelu sú na obr. 4.

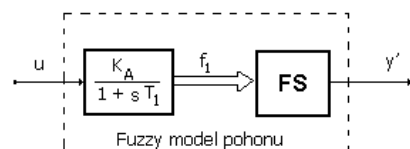


Obr. 3. Priebeh funkcie  $f_1$  a výstupu  $y$



Obr. 4. Dvojice bodov predstavujúce statickú časť fuzzy modelu

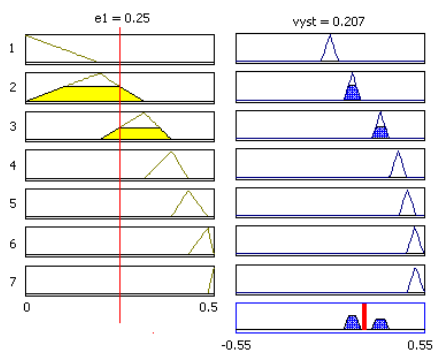
Štruktúra fuzzy modelu jednosmerného pohonu je uvedená na obr. 5.



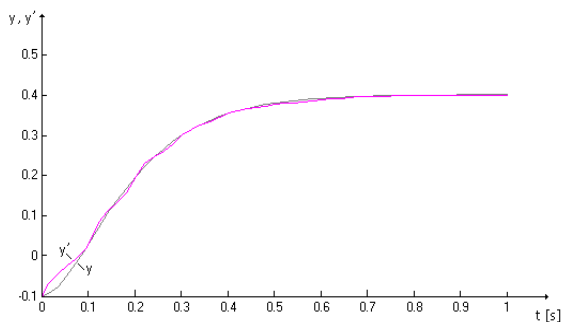
Obr. 5. Štruktúra fuzzy modelu jednosmerného pohonu

Jeho dynamická časť je zotrvačnosť 1. rádu. Statická časť FS je vytvorená pravidlami podľa obr. 6, z ktorého je zrejmé, že fuzzy systém spĺňa požiadavku č. 2 uvedenú v Kapitole II.

Na obr. 7 je zobrazené porovnanie skutočnej trajektórie s jej modelovanou fuzzy náhradou, pričom sa tieto zhodujú v bodoch, z ktorých bola navrhovaná FS časť fuzzy modelu (viď obr. 1).



Obr. 6. Štruktúra navrhnutého fuzzy systému



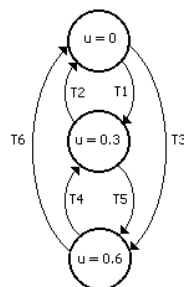
Obr. 7. Porovnanie výstupu jednosmerného pohonu s jej fuzzy modelom pre jednu vybranú trajektóriu (jednu hodnotu vstupu)

Je samozrejme možné voliť aj inú funkciu  $f_1$ , zotrvačnosť 1. rádu je však veľmi jednoduchá a ľahko realizovateľná funkcia. Pre fuzzyfikáciu akejkoľvek  $f_1$  musia byť vždy splnené podmienky uvedené v Kap. II. Ďalej je zrejme, že čím presnejšiu fuzzy aproximáciu trajektórie  $y$  požadujeme, tým viac fuzzyfikačných vrcholov nad  $f_1$  musíme vybrať, čo však vedie na väčší počet pravidiel FS (jeden vrchol = jedno pravidlo).

**B. Modelovanie celého priestoru vstupov pohonu**

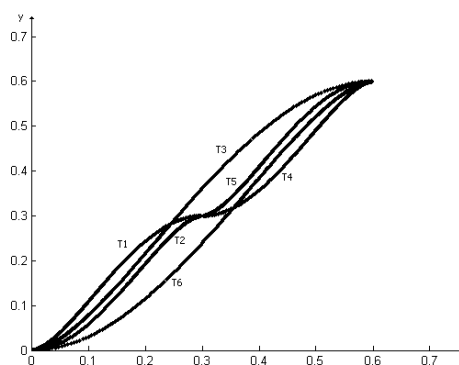
Predpokladajme, že celý rozsah vstupu  $u$  pohonu je rozdelený na  $n$  úrovní. Potom existuje  $n(n-1)$  rôznych prechodov medzi jednotlivými úrovňami vstupu  $u$ , pričom každému z nich prislúcha nejaká jednoznačne definovaná trajektória.

*Príklad 2:* Navrhujeme fuzzy model pohonu z Príkladu 1 pre celý rozsah vstupu  $u$ . Predpokladajme pre jednoduchosť, že vstup  $u$  môže nadobúdať 3 rôzne stavy, a to  $u = 0$ ,  $u = 0.3$  a  $u = 0.6$ . Pre zostavenie modelu je potrebné namerať 6 rôznych trajektórií  $T_1$  až  $T_6$ , tak, ako to ukazuje obr. 8.



Obr. 8. Geometrizácia vstupného priestoru

Z obr. 9 môžeme vidieť, že pre zvolenú hodnotu  $f_1$  vykazujú výstupy  $y$  rôzne namerané hodnoty podľa toho, ku ktorej trajektórii prislúcha dané meranie. To znamená, že táto databáza je nekonzistentná z hľadiska daného zadania a nie je principiálne možné z nej navrhnuť FS, ktorý by vyhovoval požiadavkám z Kapitoly II. Poznamenajme, že nie vždy je možný takýto jednoduchý dôkaz nekonzistencie databázy z grafickej interpretácie trajektórií (napr. pre viacrozmerný vektor  $f_1$ ). Mieru tejto nekonzistencie je možné určiť aj matematicky tak, ako je to uvedené v [7].



Obr. 9. Vlastnosti fuzzy modelu pohonu pre celý rozsah vstupu  $u$

Aby sa odstránila nekonzistencia databázy údajov (ktorá reprezentuje popis medzi zodpovedajúcimi vstupmi a výstupom pohonu), je potrebné upraviť dynamickú časť fuzzy modelu. Principiálne môžeme použiť iné vstupné funkcie  $f_1$ , rozšíriť ich počet alebo kombinovať tieto spôsoby. Pre viacvstupové FS platí, že ich výstupná hodnota v danom bode bude určite rovná hodnote z databázy údajov (požiadavka č.1, Kapitola II.) vtedy, ak je tento bod jadrom (vrcholom) jednej funkcie príslušnosti pre každú vstupnú funkciu  $f_i$ , a pre tieto hodnoty vstupov platí iba jediné pravidlo zostavené práve pre výstup tohto bodu podľa databázy. To prakticky znamená, že v tomto vrchole nesmie dochádzať k prekrývaniu nosičov funkcií príslušností od okolitých susedných bodov pre žiadny vstup  $f_i$ . Všeobecne je však rozloženie jednotlivých vstupov  $f_i$  nerovnomerné, a tak obmedzenie šírky nosičov funkcií príslušnosti spôsobuje neúplné pokrytie celého priestoru možných vstupov  $f$  (čo nevyhovuje požiadavke č.2, Kapitola II.).

Na základe predchádzajúcich úvah zvolíme dynamickú časť fuzzy modelu tak, aby obsahovala nasledujúce funkcie:

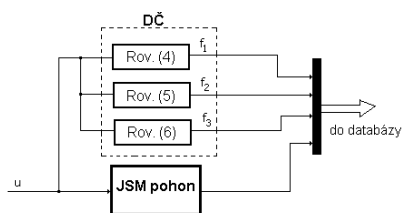
$$f_1 = \begin{cases} u_{k-1} & , \text{ ak } u_k - u_{k-1} \neq 0 \\ f_1 & , \text{ ak } u_k - u_{k-1} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2 = u \tag{5}$$

$$f_3 = \begin{cases} -\int dt + 1 & , \text{ ak } f_3 > 0 \\ 0 & , \text{ ak } f_3 = 0 \end{cases} \tag{6}$$

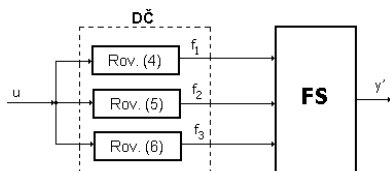
Rovnica (4) definuje začiatok trajektórie, rovnica (5) zasa jej koniec. Jednotlivé trajektórie sú medzi sebou jednoznačne rozlíšené svojím začiatočným a koncovým bodom, čo popisuje zodpovedajúca dvojica hodnôt funkcií  $f_1$  a  $f_2$ . Priemety jednotlivých trajektórií do rovín  $f_1$ - $f_2$ ,  $f_1$ - $f_3$ ,  $f_2$ - $f_3$  budú rovnobežné priamky, čo umožní fuzzyfikovať ich body so šírkou nosičov po najbližších susedov v danej osi. Tým sa pokryje celý priestor vstupných hodnôt a zároveň bude splnená požiadavka zhody výstupu FS vo vybraných bodoch s údajmi z databázy.

*Príklad 3:* Overme takto navrhnutý fuzzy model pohonu pre vstupné hodnoty z Príkladu 2. Na obr. 10 je ukázaná štruktúra pre vytvorenie vhodnej databázy údajov pre odpovedajúci fuzzy model pohonu.



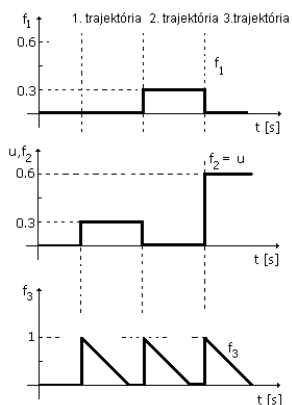
Obr.10 Štruktúra pre zber údajov do databázy

Na obr. 11 je zobrazená štruktúra fuzzy modelu jednosmerného pohonu.

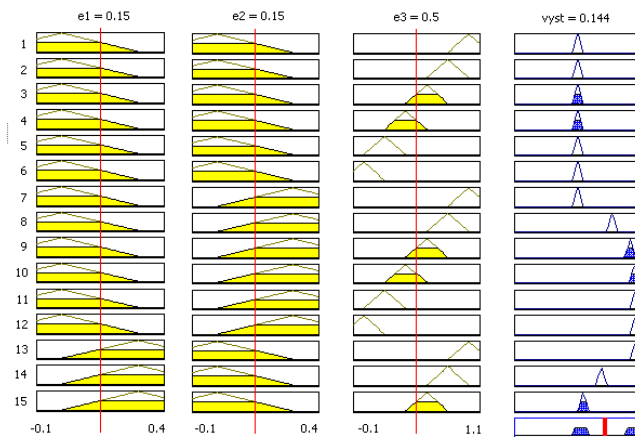


Obr.11 Štruktúra fuzzy modelu jednosmerného pohonu

Obrázok 12 zobrazuje priebehy funkcií  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ , z ktorých získame databázu údajov pre vytvorenie fuzzy modelu pohonu. Poznamenajme, že túto databázu je vhodné doplniť o trajektórie zodpovedajúce nenulovým ustáleným stavom.



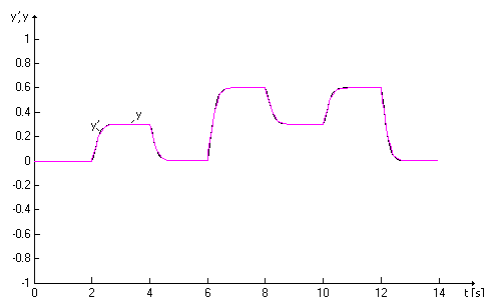
Obr.12 Priebehy funkcií  $f_1, f_2, f_3$ , pre vytvorenie databázy údajov



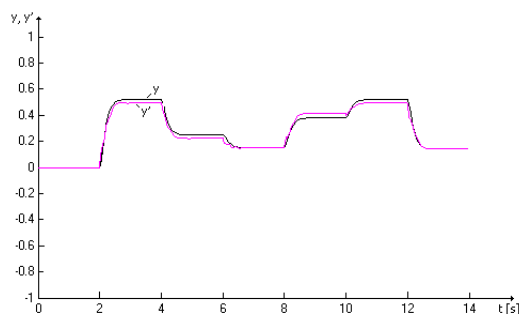
Obr.13 Grafické zobrazenie funkcií príslušnosti navrhnutého fuzzy systému

Obrázok 13 ilustruje navrhnuté funkcie príslušnosti pre prvých 15 bodov databázy, z ktorých je navrhovaný fuzzy model.

Obrázok 14 porovnáva priebehy výstupu pohonu s jeho modelom pre hodnoty vstupov z identifikačných meraní. Vidíme, že výstup fuzzy modelu je prakticky zhodný s modelovaným pohonom. Pre iné náhodne vybrané hodnoty vstupov  $u$  je toto porovnanie ukázané na obr. 15, kde sa ukazujú väčšie odchýlky modelu a pohonu v ustálených stavoch, vyplývajúce z hrubého delenia vstupu  $u$  pre tento príklad.



Obr.14 Porovnanie výstupov fuzzy modelu a JSM pohonu pre hodnoty vstupu  $u$  z identifikačných meraní



Obr.15 Porovnanie výstupov fuzzy modelu a JSM pohonu pre vybrané hodnoty vstupov  $u$

#### IV. ZHODNOTENIE A ZÁVER

Metodiku návrhu fuzzy modelu pohonu popísanú v tomto článku môžeme zhrnúť do nasledujúcich troch krokov:

1. Nameranie databázy údajov o pohone. Postup spočíva v rozdelení vstupu  $u$  pohonu do  $n$  stavov a generovanie  $n(n-1)$  prechodových trajektórií medzi nimi. Prítom zaznamenáme hodnoty funkcií  $f_1, f_2, f_3$ , ktoré tvoria dyna-

mickú časť fuzzy modelu (obr. 6a). Túto databázu je vhodné doplniť o trajektórie v nenulových ustálených stavoch.

2. Redukcia nadbytočných položiek v databáze údajov.
3. Generovanie statickej časti fuzzy modelu. Táto úloha spočíva vo fuzzyfikácii rozsahov funkcií  $f_1, f_2, f_3$ , ktorá je pri ich voľbe podľa (4) až (6) triviálna. FS potom zostavíme ako množinu fuzzy pravidiel, ktoré zodpovedajú všetkým jednotlivým položkám redukovanej databázy.

Základné vlastnosti takto navrhnutého fuzzy modelu sú:

- Pokrýva celý stavový priestor pohonu.
- Podľa požadovanej presnosti môžeme zvoliť hustotu delenia vstupu  $u$  na jednotlivé stavy.
- Pre počet zvolených vstupných úrovní  $n$  bude počet pravidiel FS vždy  $n \times n \times p$ , kde  $p$  je počet bodov zvolených na jednotlivú trajektóriu (pri doplnených trajektóriách pre ustálené stavy).
- Dynamická časť fuzzy modelu bude pre každý pohon rovnaká, zostavená podľa rovníc (4) až (6).
- Fuzzyfikácia nelineárnej statickej časti modelu FS je veľmi jednoduchá a zabezpečuje pokrytie celého stavového priestoru pohonu.
- Je zabezpečená principiálna konzistencia nameranej databázy údajov.
- Nevyžadujú sa žiadne znalosti o type pohonu, jeho štruktúre a parametroch.

Vzhľadom na uvedené vlastnosti môžeme predpokladať, že tento spôsob fuzzy modelovania bude môcť byť použitý pre ľubovoľný iný typ pohonu.

#### DODATOK

Parametre pre simuláciu JSM pohonu:

$$K_A = 4,55 \Omega^{-1}, T_I = 0,2 \text{ s}, T_A = 0,05 \text{ s}, c\phi = 0,333 \text{ Vs}, J = 0,302 \text{ kgm}^2$$

#### POĎAKOVANIE

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok



bol vypracovaný v rámci projektu "Výskum unikátneho nízkoenergetického statického zdroja pre elektrosystémy", ITMS 26220220029.

#### POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] I. Neborák, "Modelling and simulation of control electrical drive". Ostrava: VŠB TU, 2002. (in Czech)
- [2] L.X. Wang, "Fuzzy systems are universal approximators", *Proc IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*. USA: San Diego, pp. 1163-1170, 1992.
- [3] K. Zeng, N.Y. Zhang, and W.L. Xu, "A comparative study on sufficient conditions for Takagi-Sugeno fuzzy systems as universal approximators", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 8, No. 6, p. 773-780, 2000.
- [4] G. Feng, "A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 14, No. 5, 676-697, 2006.
- [5] K.S. Tang, K.F. Man, G. Chen, and S. Kwong, "An optimal fuzzy PID controller", *IEEE Transactions Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 4, p. 757-765, 2001.
- [6] Y.M. Park, M.J. Tahk and H.C. Bang, "Design and analysis of optimal controller for fuzzy systems with input constraint", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 12, No. 6, 766-779, 2004.
- [7] C.W. Tao and J.S. Taur, "Robust fuzzy control for a plant with fuzzy linear model". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 13, No. 1, p. 30-41, 2005
- [8] T.A. Johansen, "Fuzzy model based control: Stability robustness and performance issues", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 2, No. 1, 221-233, 1994.

**D. Perduková** získala titul inžiniera v odbore Technická kybernetika na Technickej univerzite v Košiciach v roku 1984. Vedecú aspirantúru ukončila v roku 1995. 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.