

# Neurónové pozorovatele pre vektorové riadenie asynchrónneho motora

## Neural estimators for vector control of induction motor

Peter Girovský<sup>1</sup>

<sup>1</sup>[peter.girovsky@tuke.sk](mailto:peter.girovsky@tuke.sk)

<sup>1</sup>Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita, Letná 9, 04200 Košice, Slovenská Republika

**Abstrakt**— Príspevok sa zaoberá návrhom neurónových pozorovateľov rýchlosti a magnetizačného prúdu pre vektorové riadenie asynchrónneho motora. Návrh neurónových pozorovateľov bol vychádzal z jednoducho merateľných veličín vo vektorovom riadení, ako sú zložky statorového prúdu a napätia. Celý návrh a simulačné overenie neurónových pozorovateľov bolo robené v programe MATLAB/Simulink.

**KLúčové slová**— *simulácia, pozorovateľ, neurónová sieť, vektorové riadenie, asynchrónny motor*

**Abstract**— The paper deals with the design of the neural estimators of speed and magnetization current for vector control of the asynchronous motor. The design of neural estimators was based on simple measurable variables in vector control, such as components of stator current and voltage. The whole design and simulation verification of neural estimators was done in MATLAB/Simulink.

**Keywords**— *simulation, estimator, neural network, vector control, induction motor*

### I. ÚVOD

Klasické riešenie regulačných problémov elektrických pohonov vychádza zo znalosti matematického modelu sústavy. V lineárnych časovo premenných sústavách môže byť ich model natoľko zložitý, že algoritmus riadenia, vychádzajúci z toho modelu, nie je riešiteľný v reálnom čase. Naproti tomu riadenie na báze teórie fuzzy množín a umelých neurónových sietí nevyžaduje znalosť matematického modelu regulovanej sústavy. Hlavným znakom týchto spôsobov riadenia je schopnosť adaptácie a učenia, využitím čoho sa riadenie skvalitňuje. Moderné aplikácie umelej inteligencie v elektrických pohonoch založené na použití fuzzy logiky, alebo teórie neurónových sietí, ktoré pracujú vo funkcii pozorovateľov stavových veličín pre bezsnímačové regulované pohony, alebo pracujú ako regulátory rýchlosti a polohy. Vo všeobecnosti aplikácie umelej inteligencie v elektrických pohonoch môžu viesť k zlepšeniu vlastností a zvýšeniu robustnosti voči zmenám záťaže alebo parametrov sústavy.

Bezsnímačovému vektorovému riadeniu a modernému riadeniu na báze neurónových sietí je v poslednej dobe venovaná veľká pozornosť. Bezsnímačové riadenie eliminuje senzory rýchlosti, toku a momentu a nahrádza ich približným výpočtom na báze digitálneho signálového procesora z okamžitých hodnôt statorových napätí a prúdov použitím modelu asynchrónneho motora. V praxi sa najčastejšie používa MRAS

(Model Reference Adaptive System) štruktúry pozorovania uhlovej rýchlosti, alebo pozorovatele založené na Kalmanovom filtri. V poslednom období je výskumná činnosť zameraná na použitie neurónových sietí v riadení nelineárnych funkcií so želaným stupňom presnosti. Predpokladá sa, že v budúcnosti viac funkcií bude integrovaných v jednej neurónovej sieti a napokon jedna alebo dve neurónové aplikácie – špecifické čipy s integrovanými obvody, budú schopné pokryť celé riadenie elektrického pohonu.

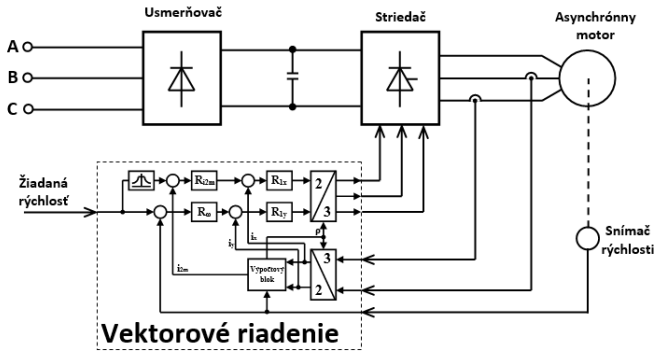
### II. SIMULAČNÝ NÁVRH NEURÓNOVÝCH POZOROVATEĽOV PRE VEKTOROVÉ RIADENIE ASYNCHRÓNNEHO MOTORA

Pomocou umelých neurónových sietí môžeme odhadovať uhlovú rýchlosť asynchrónneho motora, prípadne iné nemerateľné veličiny.

V súčasnosti sa v priemysle bežne používajú regulované pohony, ktoré využívajú rôzne techniky riadenia. Pri vektorovom riadení vieme samostatne riadiť tok ako aj moment asynchrónneho motora, pričom asynchrónny motor môže byť riadený lineárne, podobne ako cudzobudený jednosmerný motor. Rovnaký výkon ako pri riadení jednosmerného motora môžeme dosiahnuť zachovaním ortogónalnej orientácie medzi jednotlivými vektorovými zložkami orientovanými v statorových alebo rotorových súradniciach. Použitím princípu vektorového riadenia, je zložka statorového prúdu  $i_{d1}$  orientovaná v smere vektora toku a zložka statorového prúdu  $i_{q1}$  je orientovaná v smere kolmom k nemu. Orientácia toku rotora vo vnútri rotora asynchrónneho motora s klieťkou nemôže byť priamo meraná, ale môže byť získaná pomocou výstupných premenných.

Po použití transformácie súradníc  $d, q$  na rotačný systém  $x, y$  bude elektrický krútiaci moment úmerný zložke  $i_{ly}$  a vzťah medzi tokom rotora a zložkou  $i_{lx}$  je daný lineárnou prenosovou funkciou prvého rádu, kde  $T_2=L_2/R_2$  je časová konštanta.

Z tohto dôvodu sa pri uvažovaní vektorového riadenia ako vstupné signály pre pozorovateľ uhlovej rýchlosti asynchrónneho motora zvolili statorové zložky prúdu a napätia. Navrhnuté pozorovatele boli učené pomocou zvolených učiacich algoritmov na základe množiny vstupných údajov získaných z vektorového riadenia asynchrónneho motora. Princípiálna schéma riadenia je zobrazená na obr. 1.

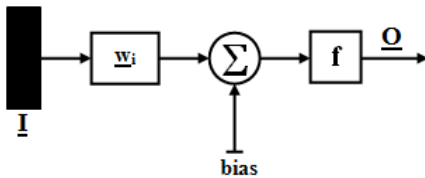


Obr. 1. Principiálna schéma vektorového riadenia

#### A. Neurónový pozorovateľ magnetizačného prúdu

Ak pri vektorovom riadení x-ovú zložku vektora statorového prúdu považujeme za tokotvornú, potom magnetizačný prúd  $i_{2m}$  budeme pozorovať na základe práve tejto zložky statorového prúdu.

Ako už bolo spomenuté vyššie, neurónový pozorovateľ magnetizačného prúdu  $i_{2m}$  bude vychádzať z hodnoty zložky statorového prúdu  $i_{1x}$ . Závislosť medzi prúdmi  $i_{2m}$  a  $i_{1x}$  je lineárna, a preto pozorovateľ môže byť vytvorený pomocou jednoduchej doprednej neurónovej siete bez skrytej vrstvy. Ako prenosovú funkciu je možné použiť lineárnu funkciu *purelin*. Vstupný vektor sa potom bude skladať z hodnôt statorového prúdu  $i_{1x}$  v kroku ( $k$ ) a kroku ( $k-1$ ) a predchádzajúcej hodnoty magnetizačného prúdu  $i_{2m}$  v kroku ( $k-1$ ). Principiálna schéma takéhoto neurónového pozorovateľa magnetizačného prúdu je znázornená na obr. 2.



Obr. 2. Principiálna schéma neurónového pozorovateľa magnetizačného prúdu

Kde,  $\underline{O}$  predstavuje vektor výstupných veličín,  $\underline{I}$  je vektor vstupných veličín a  $w_i$  reprezentuje váhy jednotlivých neurónových prepojení.

$$\underline{O} = f \left[ \sum \underline{I} \cdot \underline{w}_i + \text{bias} \right] \quad (1)$$

Nahradením vstupnej matice v rovnici 1, dostávame rovnicu pre neurónový pozorovateľ magnetizačného prúdu v nasledujúcom tvare:

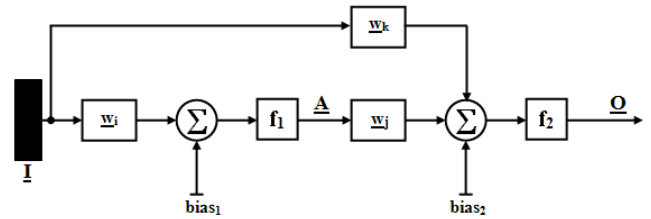
$$i_{2m}(k) = \text{purelin} \left( \begin{bmatrix} i_{1x}(k) \\ i_{1x}(k-1) \\ i_{2m}(k-1) \end{bmatrix} w_i + \text{bias} \right) \quad (2)$$

Kde magnetizačný prúd  $i_{2m}(k)$  predstavuje výstupnú veličinu a vstupnými veličinami sú zložky  $i_{1x}(k)$ ,  $i_{1x}(k-1)$  a  $i_{2m}(k-1)$ .

#### B. Neurónový pozorovateľ uhlovej rýchlosti

Ak pri vektorovom riadení y-ové zložky vstupného vektora považujeme za momentotvorné, potom neurónový pozorovateľ uhlovej rýchlosti bude vychádzať práve z týchto zložiek statorového napätia a prúdu.

Ako už bolo spomenuté vyššie, neurónový pozorovateľ uhlovej rýchlosti  $\omega$  vychádza z momentotvornej zložky statorového napätia  $u_{1y}$  a prúdu  $i_{1y}$ . Vzťah medzi vstupnými a výstupnými veličinami nepredstavuje jednoduchú lineárnu závislosť, preto pri návrhu neurónového pozorovateľa použijeme kaskádu neurónov s jednou skrytou vrstvou pozostávajúcou z ôsmich neurónov. Ako prenosová funkcia pre skrytú vrstvu bola použitá nelineárna funkcia *tansig* a pre výstupnú vrstvu bola použitá lineárna funkcia *purelin*. Vstupný vektor je reprezentovaný hodnotami statorového napätia  $u_{1y}$  a statorového prúdu  $i_{1y}$  v krokoch ( $k$ ) a ( $k-1$ ), ako aj hodnotou magnetizačného prúdu  $i_{2m}$  v krokoch ( $k$ ) a ( $k-1$ ). Principiálna schéma takéhoto neurónového pozorovateľa rýchlosti je znázornená na obr. 3.



Obr. 3. Principiálna schéma neurónového pozorovateľa uhlovej rýchlosti

Na obrázku 3,  $\underline{O}$  predstavuje vektor výstupných veličín,  $\underline{I}$  predstavuje vektor vstupných veličín a  $w_i$ ,  $w_j$ ,  $w_k$  predstavujú váhy jednotlivých neurónov.

$$\underline{A} = f_1 \left[ \sum \underline{I} \cdot \underline{w}_i + \text{bias}_1 \right] \quad (3)$$

$$\underline{O} = f_2 \left[ \sum (\underline{A} \cdot \underline{w}_j + \underline{I} \cdot \underline{w}_k) + \text{bias}_2 \right]$$

Po aplikovaní vstupnej matice do rovnice 3, môžeme neurónový pozorovateľ uhlovej rýchlosti popísať nasledujúcou rovnicou:

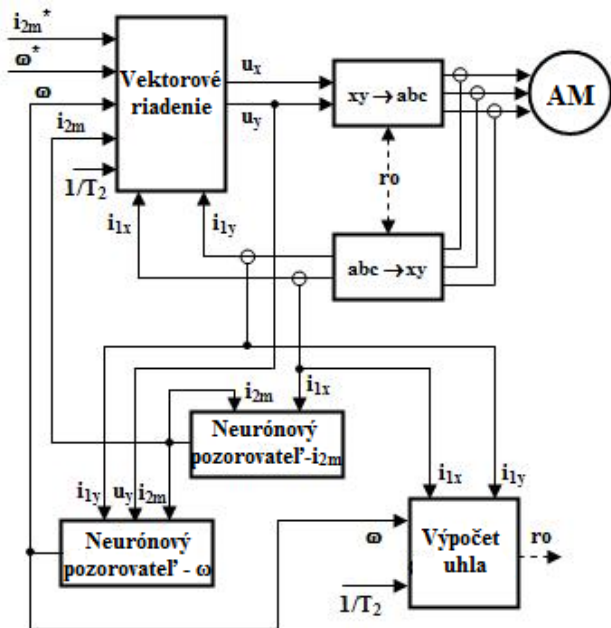
$$\omega(k) = \text{purelin} \left( \begin{bmatrix} u_{1y}(k) \\ u_{1y}(k-1) \\ i_{1y}(k) \\ i_{1y}(k-1) \\ i_{2m}(k) \\ i_{2m}(k-1) \end{bmatrix} w_j + \text{tansig} \left( \begin{bmatrix} u_{1y}(k) \\ u_{1y}(k-1) \\ i_{1y}(k) \\ i_{1y}(k-1) \\ i_{2m}(k) \\ i_{2m}(k-1) \end{bmatrix} w_i + \text{bias}_1 \right) w_k + \text{bias}_2 \right) \quad (4)$$

Kde výstupnou veličinou je uhlová rýchlosť  $\omega(k)$  a vstupné veličiny predstavujú zložky statorových napätí a prúdov  $u_{1y}(k)$ ,  $u_{1y}(k-1)$ ,  $i_{1y}(k)$ ,  $i_{1y}(k-1)$ ,  $i_{2m}(k)$  a  $i_{2m}(k-1)$ .

### III. SIMULAČNÉ VÝSLEDKY

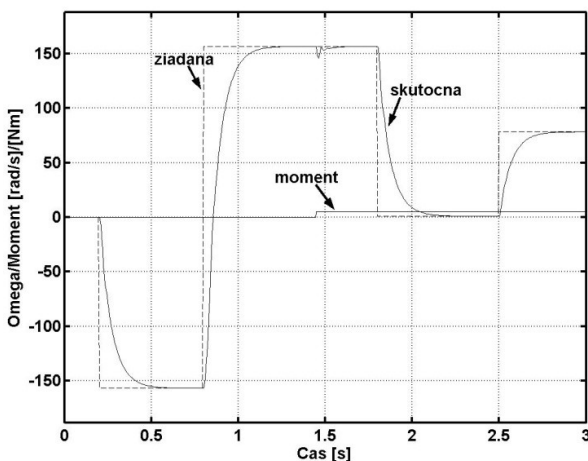
V nasledujúcej časti sú prezentované simulačné výsledky bezsnímačového vektorového riadenia asynchrónneho motora s neurónovými pozorovateľmi rýchlosti a magnetizačného prúdu. Principiálna schéma vektorového riadenia s neurónovými pozorovateľmi magnetizačného prúdu a rýchlosti je zobrazená na obr. 4.

Simulačný návrh a učenie neurónových sietí bolo robené pre asynchrónny motor s nasledujúcimi parametrami:  $P_n=0,75$  kW;  $U_n=220V/380V$ ;  $I_n=3,8$  A/2,2 A;  $n_n=1380$  rpm;  $p=2$ ;  $s=0,08$ ;  $J=5,4 \cdot 10^{-3}$  kgm<sup>2</sup>



Obr. 4. Principiálna schéma vektorového riadenia s neurónovými pozorovateľmi

Na obr. 5 je zobrazený simulačný priebeh uhlovej rýchlosti asynchrónneho motora pri vektorovom riadení s neurónovými pozorovateľmi, kde čiarkovanou je zobrazený priebeh žiadanej a plnou čiarou priebeh skutočnej uhlovej rýchlosti.



Obr. 5. Priebehy žiadanej a aktuálnej hodnoty rýchlosti asynchrónneho motora

#### IV. ZÁVER

V tomto príspevku bol prezentovaný návrh neurónových pozorovateľov pre vektorové riadenie asynchrónneho motora. Neurónové pozorovateľe rýchlosti a magnetizačného prúdu boli navrhnuté na základe ľahko merateľných veličín, ako sú zložky statorového prúdu a napätia, pričom pri návrhu neurónových pozorovateľov boli použité dopredné a kaskádne neu-

rónové siete. Obe tieto siete boli tréňované off-line pomocou algoritmu Levenberg-Marquardt. Tento algoritmus predstavuje modifikáciu tradičného učiaceho algoritmu spätného šírenia chyby. Dosiahnuté výsledky sú zobrazené na simulačných priebehoch a potvrdzujú možnosť využitia umelých neurónových sietí pri vektorovom bezsnímačovom riadení asynchrónneho motora, pričom sa potvrdili adaptabilita a robustnosť neurónových sietí.

#### POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0750.

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

Táto práca vznikla s podporou grantu VEGA 1/0187/18.

#### POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Vas P., "Artificial-intelligence-based electrical machines and drives", Oxford University Press, Oxford, 1999.
- [2] Vittek J., Dodds S. J., Makyš P., Lehocký P., "An Observer Design for Forced Dynamics Control of AC Drives", Transcom 2007, Žilina, Slovensko, pp.207-210, 2007.
- [3] Vittek J., Bris P., Štulrajter M., Pácha M., "Chattering free sliding mode control law for position control of the drive employing induction motor", Power Engineering Conference 2008, AUPEC '08, Australasian Universities, pp.1-6, 14-17 Dec., 2008.
- [4] Kuchar M., Brandštetter P., Kaduch M., "Sensorless induction motor drive with neural network". IEEE, Annu. Power Elec. Specialists Conf.m pp.3301-3305, 2004.
- [5] Jovankovič J., Zalman M., "Application of the virtual sensors based on the artificial neural networks", EDPE'03, International conference, Slovakia, 2003, pp.486-490.
- [6] Bensalem Y., Abboud W., Sbita L., Abdelkrim M.N., "A Sensorless Neural Network Speed Control of Induction Motor Drive", Int. Journal of Signal System Control and Engineering Application 1 (2): pp.150-158, 2008.
- [7] Jadlovská A., Kabakov N., Sarnovský J., "Predictive Control Design Based on Neural Model of a Non-linear System", Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 5, No. 4, pp. 93-108, 2008.
- [8] Jamuna V., Reddy S. R., "Modeling and speed control of induction motor 9rives using neural network", Annals of Diarea de Jos University of Galati, III., Vol. 33, No. 1, pp. 40-49, 2010.
- [9] Hasse K., "Zur Dynamik Drehzahlgeregelter Antriebe mit stromrichter-gespeisten Asynchron-kurschlussläufer Maschinen", Techn. Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1969, pp.74-78.
- [10] Blaschke F., "The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvektor Closed-Loop Control System for Rotating-Field Machines", Siemens Rev. 39 (5): 1972, pp. 217-220.
- [11] Timko J., Žilková J., Balara D., "Artificial neural networks application in electrical drives", (in Slovak), Calypso s.r.o., Košice, 2002, p. 239, ISBN 80-85723-27-1.
- [12] Timko J., Žilková J., Girovský P., "Shaft Sensorless Vector Control of an Induction Motor", In: Acta Technica CSAV, Vol. 52, no. 1 (2007), pp. 81-91, ISSN 0001-7043.
- [13] Timko J., Žilková J., Girovský P., "Modeling and control of electrical drives using neural networks", (in Slovak), C-Press, Košice, 2009, p. 202, ISBN 978-80-8086-124-7.
- [14] Žilková J., Timko J., Girovský P., "Nonlinear System Control Using Neural Networks", Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 3, No. 4, pp. 85-94, 2006.

**P. Girovský** sa narodil v roku 1979 vo Vranove nad Topľou. V roku 2003 získal titul Ing. a v roku 2009 získal titul PhD. na Fakulte elektrotechniky a informatiky TU v Košiciach v odbore Silnoprúdové inžinierstvo. V súčasnosti pracuje ako odborný asistent na Katedre elektrotechniky a mechatroniky FEI TU v Košiciach.