

# PRIEBEŽNÁ IDENTIFIKÁCIA ROTOROVÉHO ODPORU AM NA BÁZE UMELÝCH NEURÓNOVÝCH SIETÍ

## (ON-LINE IDENTIFICATION OF A ROTOR RESISTOR OF AN INDUCTION MOTOR USING THE NEURAL NETWORK)

Jaroslava ŽILKOVÁ, Jaroslav TIMKO

Katedra elektrických pohonov a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel. 055/602 2273, E-mail: Jaroslava.Zilkova@tuke.sk, Jaroslav.Timko@tuke.sk

### SUMMARY

*This paper deals with the advanced method for identification a rotor resistor of an induction motor, presents a new method to on-line identification on a base of artificial neural networks (ANNs). ANNs are recently showing good promise for application in power electronics and motion control system. They have been applied mainly in control of converters and drives. The purpose of this paper is to show that such a technology can be applied for identification of parameters in an area of electrical drives.*

*A feedforward ANN is designed to a rotor resistor identification of an induction. motor drive. The structure of the neural network is analogues to the mathematical model of an induction motor. The identification is based on on-line learning principle using backpropagation algorithm. Stator currents and stator voltages and speed of the induction motor are inputs of the neural network. The basic idea of this approach is to describe how a feedforward neural network can in real time estimate rotor resistor of an induction motor without previous training. The simulation using Matlab with Simulink realises the application results. The results of simulated experiments indicate that a neural network can be an alternative way to other identification methods.*

**Keywords:** artificial neural network, control system, induction motor, on-line identification, simulation

### 1. ÚVOD

Obsahom článku je návrh nového spôsobu identifikácie parametrov systému s využitím teórie umelých neurónových sietí a známeho matematického popisu systému. Pri chode asynchrónneho motora (AM) je možné očakávať vplyvom oteplenia rotora pomerne veľké zmeny rotorového odporu. Parametre motora je možné určiť klasickými metódami vychádzajúcimi zo statických meraní stroja naprázdno a nakrátko alebo pomocou dynamických metód určovania parametrov [3], [5].

Medzi moderné metódy identifikácie parametrov systémov patria aj metódy využívajúce teóriu umelých neurónových sietí alebo genetických algoritmov [1], [2], [6]. Tieto metódy umožňujú off-line i priebežnú identifikáciu parametrov. On-line použitie je väčšinou obmedzené charakterom testovacích signálov, výkonom hardwaru a identifikačným algoritmom.

Nižšie opísanú metódu je možné použiť pre priebežné sledovanie hodnoty rotorového odporu bez nutnosti generovania zložitých testovacích signálov a predchádzajúceho tréningu neurónovej siete.

### 2. PRIEBEŽNÉ POZOROVANIE HODNOTY ROTOROVÉHO ODPORU AM

Hodnoty rotorového odporu je vhodné identifikovať na základe ľahko merateľných veličín ako sú statorové prúdy, statorové napätia a uhlová rýchlosť motora. Ak predpokladáme známe hodnoty ostatných parametrov motora je možné algoritmus

priebežnej identifikácie rotorového odporu rozdeliť do nasledujúcich krokov :

- Rekonštrukcia zložiek vektora rotorového toku v súradnicovom systéme  $\{\alpha, \beta\}$  pevne spojenom so statorom na základe merania statorových prúdov a napätí.
- Priebežné pozorovanie zložiek vektora rotorového toku v súradnicovom systéme  $\{\alpha, \beta\}$  neurónovou sieťou na základe merania statorového prúdu, napätia a uhlovej rýchlosti rotora.
- Určenie hodnoty odporu rotora z priebežne aktualizovaných váh neurónovej siete.

#### 2.1 Matematický model asynchrónneho motora pre identifikovanie odporu rotora

Vzťahy opisujúce dynamický model asynchrónneho motora s kotvou na krátko, odvodený pri známych zjednodušujúcich predpokladoch, po prepočítaní na dvojpólový stroj a do točivej súradnicovej sústavy  $x, y$  (index  $k$ ) sú nasledujúce:

$$\mathbf{u}_{1k} = R_1 \cdot \mathbf{i}_{1k} + \frac{d\psi_{1k}}{dt} + j\omega_k \psi_{1k}, \quad (1)$$

$$0 = R_2 \cdot \mathbf{i}_{2k} + \frac{d\psi_{2k}}{dt} + j(\omega_k - \omega) \psi_{2k}, \quad (2)$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} = \frac{3p}{2} \text{Im}[\psi_{1k}^c \mathbf{i}_{1k} - m_z], \quad (3)$$

Zo všeobecných rovníc asynchrónneho motora s kotvou na krátko môžeme, v statorových

súradniciach t.j.  $\omega_k=0$ , vyjadriť vzťah (1) nasledovne:

$$\mathbf{u}_1 = R_1 \cdot \mathbf{i}_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad (4)$$

Pre magnetické toky statora a rotora platí:

$$\psi_1 = L_1 \cdot \mathbf{i}_1 + L_h \cdot \mathbf{i}_2 \quad (5)$$

$$\psi_2 = L_2 \cdot \mathbf{i}_2 + L_h \cdot \mathbf{i}_1 \quad (6)$$

kde:

- $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$  - vektor statorového ( rotorového) prúdu
- $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$  - vektor statorového ( rotorového) napätia
- $\psi_1, \psi_2$  - vektor statorového ( rotorového) magnetického toku
- $\omega_k, \omega$  - synchronná (mechanická) uhlová rýchlosť
- $R_1, R_2$  - odpor statorového ( rotorového) vinutia
- $L_1, L_2$  - indukčnosť statorového ( rotorového) vinutia
- $L_h$  - hlavná indukčnosť
- $p$  - počet pólových párov
- $J$  - moment zotrvačnosti
- $m_z$  - záťažný moment

Po vyjadrení zložiek magnetického toku statora a rotorového prúdu z rovníc (5) a (6), môže byť vzťah (4) vyjadrený v tvare komplexných priestorových vektorov:

$$\mathbf{u}_1 = R_1 \cdot \mathbf{i}_1 + \frac{L_h}{L_2} \frac{d\psi_2}{dt} + \left( L_1 - \frac{L_h^2}{L_2} \right) \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \quad (7)$$

Ako vyplýva zo vzťahu (7), na základe merania zložiek statorového prúdu a statorového napätia, môžeme rekonštruovať zložky magnetického toku rotora, ktoré sú potrebné ako referenčný signál pri učení neurónovej siete. Spôsoby rekonštrukcie podľa vzťahu (7) môžu byť rôzne, výpočtovým blokom alebo napr. neurónovou sieťou ako je to naznačené na obr. 1.

Na rekonštrukciu hodnoty rotorového odporu môžeme využiť časť matematického modelu motora, vyjadreného vzťahom (2).

Na základe klasickej  $\{\alpha, \beta\}$  transformácie, môžeme pomocou dynamického modelu asynchrónneho motora zo vzťahu (2) vyjadriť pre jednotlivé zložky rotorového napätia nasledovné vzťahy:

$$u_{2\alpha} = R_2 \cdot i_{2\alpha} + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \omega \cdot p \cdot \psi_{2\beta} \quad (8)$$

$$u_{2\beta} = R_2 \cdot i_{2\beta} + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} - \omega \cdot p \cdot \psi_{2\alpha} \quad (9)$$

Pri uvažovaní asynchrónneho motora s kotvou nakrátko a vyjadrení zložiek vektora rotorového prúdu  $\mathbf{i}_2$  zo vzťahov (5) a (6), môžu byť rovnice (8) a (9) prepísané do tvaru:

$$\frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} (\psi_{2\alpha} - L_h \cdot i_{1\alpha}) - \omega \cdot p \cdot \psi_{2\beta} \quad (10)$$

$$\frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} (\psi_{2\beta} - L_h \cdot i_{1\beta}) + \omega \cdot p \cdot \psi_{2\alpha} \quad (11)$$

Ak vyjadríme rovnice (10) a (11) v diskretnom tvare, dostaneme vzťahy :

$$\hat{\psi}_{2\alpha}(k+1) = \psi_{2\alpha}(k) - (\Delta T \cdot R_2 / L_2) \dots \dots (\psi_{2\alpha}(k) - L_h \cdot i_{1\alpha}(k)) - p\omega(k) \cdot \Delta T \cdot \psi_{2\beta}(k) \quad (12)$$

$$\hat{\psi}_{2\beta}(k+1) = \psi_{2\beta}(k) - (\Delta T \cdot R_2 / L_2) \dots \dots (\psi_{2\beta}(k) - L_h \cdot i_{1\beta}(k)) + p\omega(k) \cdot \Delta T \cdot \psi_{2\alpha}(k) \quad (13)$$

na základe ktorých, pri známych hodnotách ostatných parametrov motora, môžeme navrhnuť štruktúru pozorovateľa rotorového odporu. Priebežná identifikácia, ako vyplýva z rovníc (12) a (13), bude založená na meraní statorových prúdov, statorových napätí a uhlovej rýchlosti motora.

## 2.2 Návrh pozorovateľa rotorového odporu AM

Topológiu neurónovej siete určíme na základe vzťahov (12) a (13) v tvare:

$$\hat{\mathbf{Y}} = W_1 \mathbf{X}_1 + W_2 \mathbf{X}_2 + W_3 \mathbf{X}_3 \quad (14)$$

Váha  $W_3$  neurónovej siete bude odpovedať parametrom asynchrónneho motora:

$$W_3 = \frac{R_2}{L_2} \quad (15)$$

pričom za váhy siete  $W_1$  a  $W_2$  zvolíme:

$$W_1 = 1, W_2 = -\omega \cdot p \quad (16)$$

Ak vstupy pozorovateľa označíme nasledovne:

$$\mathbf{X}_1 = \psi_2(k) \cdot \mathbf{I} \quad , \quad \mathbf{X}_2 = \Delta T \cdot \psi_2(k) \cdot \mathbf{I}_1$$

a  $\mathbf{X}_3 = \Delta T \cdot (L_h \cdot \mathbf{i}_1(k) - \psi_2(k)) \cdot \mathbf{I} \quad , \quad (17)$

kde

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{a} \quad \mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} ,$$

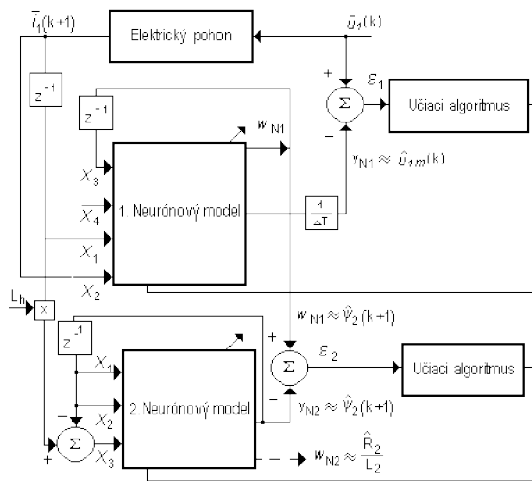
potom výstupom pozorovateľa budú jednotlivé zložky vektora rotorového toku:

$$\hat{\mathbf{Y}}(k+1) = \psi_2(k+1) \quad (18)$$

Model (14) predstavuje doprednú dvojrvtstovú neurónovú sieť v úlohe pozorovateľa zložiek magnetického toku rotora, kde vstupy siete sú tvorené zložkami vektora statorového prúdu  $\bar{i}_1(k)$ , zložkami vektora rotorového toku  $\bar{\psi}_2(k)$  a uhlovou rýchlosťou  $\omega(k)$ .

Aby neurónová sieť mohla adaptovať svoje parametre, je potrebné zvoliť vhodnú referenčnú

veličinu. Výstupom neurónového modelu, ako vyplýva zo vzťahu (18), sú zložky vektora rotorového toku  $\hat{\psi}_2(k+1)$ , preto je vhodné, aby týmito referenčnými veličinami boli práve zložky vektora rotorového toku.



**Obr. 1** Štruktúra priebežnej identifikácie hodnoty rotorového odporu

**Fig. 1** Design of the structure for on-line identification of rotor resistor value

Na základe merania statorových prúdov a napätí, môžeme rekonštruovať referenčné zložky vektora rotorového toku. Neurónová sieť (obr. 1) na základe rozdielu svojho výstupu a referenčných hodnôt adaptuje svoje parametre, pričom z jej parametra váhy  $W_3$  môžeme, na základe známej hodnoty  $L_2$ , priebežne vyhodnocovať hodnotu rotorového odporu.

### 2.3 Adaptácia váh neurónovej siete

Ak bude výstup druhej neurónovej siete  $Y_{N2}(k+1)$  konvergovať k priebehu referenčnej hodnoty (obr. 1), ktorá je nepriamo získavaná z váhy  $W_4$  prvej siete alebo priamo z výpočtového bloku na vzťah, potom po adaptácii váh druhej siete približne platí:

$$\hat{R}_2 = W_{3N2} \cdot L_2. \quad (19)$$

Váhy druhej siete sú aktualizované tak, aby minimalizovali kritériálnu funkciu:

$$E = 1/2 e^2(k), \quad (20)$$

pričom chyba medzi referenčnou hodnotou a hodnotou výstupu druhej siete je :

$$e(k) = \psi_2(k+1) - \hat{\psi}_2(k+1). \quad (21)$$

Neurónová sieť aktualizuje svoje váhy metódou backpropagation. Z aktualizovaných hodnôt váhy  $W_{3N2}$  je možné vyjadriť hodnotu časovej konštanty rotora  $T_2$ , z ktorej pri známej hodnote  $L_2$  zo vzťahu (15) následne obdržíme hodnotu rotorového odporu  $R_2$ .

Na základe adaptácie váhy  $W_{3N2}$  môžeme vyjadriť adaptáciu hodnoty rotorového odporu nasledovne:

$$\hat{R}_2(k+1) = \hat{R}_2(k) + \eta(\psi_{2N1}^*(k) - \hat{\psi}_{2N2}(k)) \Delta T L_2 X_3, \quad (22)$$

kde  $\eta$  je parameter učenia.

V nasledujúcej časti sú uvedené výsledky simulačných experimentov.

### 3. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

Návrh bol uskutočnený pre asynchrónny motor s kotvou nakrátko s nasledovnými parametrami:

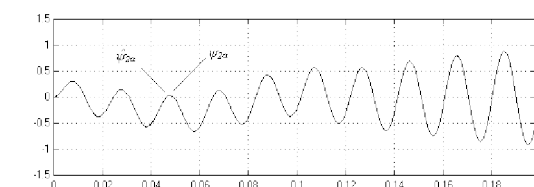
$$P_N = 3 \text{ kW}, U_N = 380 \text{ V}, I_N = 9,6 \text{ A}, f_N = 50 \text{ Hz}, \\ n_N = 1420 \text{ ot/min}, J = 0,1 \text{ kgm}^2, L_m = 184 \text{ mH}, \\ L_1 = L_2 = 8,85 \text{ mH}, R_1 = 1,81 \text{ } \Omega, R_2 = 1,91 \text{ } \Omega, p = 2.$$

Simulácie boli prevedené prostredníctvom programu Simulink v prostredí MATLAB.

Na obr.2 je zobrazený priebeh zmeny  $\alpha$  zložky rotorového toku v prípade priameho pripojenia motora na sieť. Na tomto obrázku sú zobrazené oba priebehy, rekonštruovaný priebeh odvodený z matematického modelu a výstup neurónovej siete. Ako vyplýva z obr.2 neurónová sieť sleduje priebeh rotorového toku s dostatočnou presnosťou. Detail týchto priebehov pri náhlej zmene zaťaženia v čase  $t = 0,4s$  je uvedený na obr. 3.

Na obr. 4 je uvedený zvolený priebeh zmeny hodnoty rotorového odporu od 100%  $R_{2N}$  po 150%  $R_{2N}$  spolu s identifikovaným priebehom  $R_2$  z neurónovej siete.

$\psi_{2\alpha}$  [Wb]

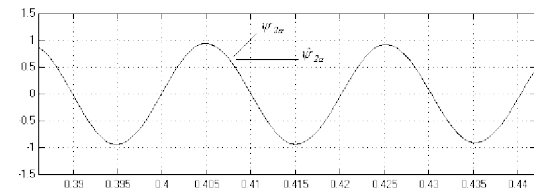


t [s]

**Obr. 2** Priebeh pozorovanej a referenčnej  $\alpha$  zložky rotorového toku AM pri priamom pripojení AM na sieť

**Fig. 2** Estimated and referenced course of  $\alpha$ -rotor flux component of IM at motor starting

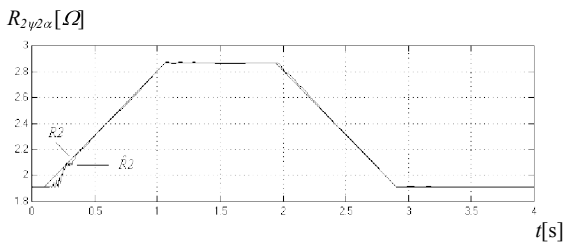
$\psi_{2\alpha}$  [Wb]



t [s]

**Obr. 3** Detail pozorovaného a referenčného priebehu  $\psi_{2\alpha}$ ,  $\hat{\psi}_{2\alpha}$ , pri zmene zaťaženia v  $t = 4s$

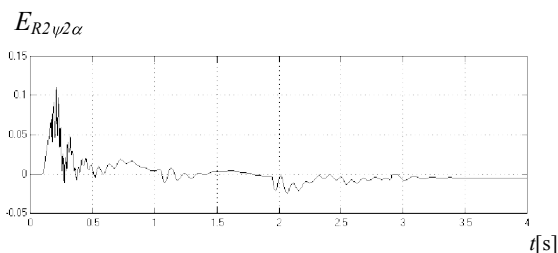
**Fig. 3** Detail of estimated and referenced course of  $\alpha$ -rotor flux component, change of load in  $t = 4s$



**Obr. 4** Priebeh skutočnej a identifikovanej hodnoty rotorového odporu od 100%  $R_{2N}$  do 150%  $R_{2N}$

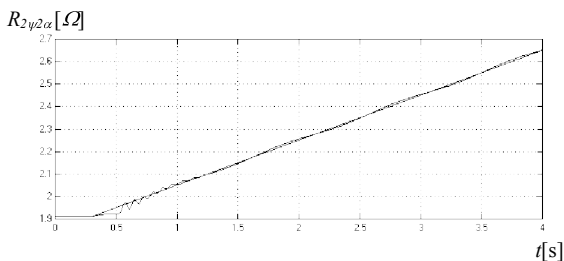
**Fig. 4** Courses of rotor resistor real and identified value from 100%  $R_{2N}$  to 150%  $R_{2N}$

Na obr. 5 je zobrazený priebeh chyby identifikácie podľa obr. 4.



**Obr. 5** Chyba identifikácie podľa obr. 4  
**Fig. 5** The identification error by Fig. 4

Pri lineárnej zmene  $R_2 = 1,4 \cdot R_{20}$  za  $t = 3,2s$  je na obr. 6 zobrazený priebeh referenčnej a identifikovanej hodnoty  $R_2$ .



**Obr. 6** Priebeh skutočnej a pozorovanej hodnoty rotorového odporu pre pomalšiu zmenu  $R_2$

**Fig. 6** Actual and estimated courses of the rotor resistor for the slower change  $R_2$

Neurónová sieť na základe pozorovania  $\alpha$ -zložky magnetického toku rotora poskytuje presnejšie výsledky, než na základe pozorovania  $\beta$ -zložky magnetického toku rotora. V dynamickom stave je chyba približne 1,3% a v ustálenom stave nie je chyba viac než 0,3%.

Ako vyplýva z obr. 6, na ktorom je znázornená odozva na pomalšiu zmenu odporu je absolútna chyba pri identifikácii neurónovou sieťou približne  $0,005\Omega$ , a relatívna chyba je približne 0,25%.

#### 4. ZÁVER

V príspevku je navrhnutý neurónový identifikátor rotorového odporu asynchrónneho motora s kotvou nakrátko, ktorý nevyžaduje časovo náročnú etapu predbežného tréningu. Jeho

najväčšou výhodou je, že výber topológie neurónovej siete vyplýva zo známej štruktúry systému a keďže jeho učenie prebieha v režime on-line, nie je potrebná ani príprava vstupno-výstupných tréningových vzoriek.

Pri zmene typu pohonu je možné použiť túto metódu bez úprav, zmenia sa len hodnoty parametrov motora.

#### LITERATÚRA

- [1] Balara, D. - Žilková, J.: Parametric Identification of Nonlinear DC Motor Model Using Neural Networks, Proceedings of EDPE'96 Conference, Stará Lesná, October 1996, pp. 548-553.
- [2] Balara, D. - Timko, J.: Estimation of Induction Motor Parameters Using Neural Networks Principles, Proceedings of the Conference, PEMC'98, Prague, 1998.
- [3] Clerc, G. - Chouiter, D. R. - Besson, C. - Bellaaj, N. - Rabet, M. - Retif, J. M.: Comparative Study of Identification Methods for Induction Machines, EPE'97, Trondheim, September 1997, pp. 1.524-1.529.
- [4] Demuth, H. - Beale, M.: Neural Network Toolbox. User Guide. The Mathworks Inc., USA, 1994.
- [5] Hrabovcová, V. - Janoušek, L.- Rafajdus, P. Ličko, M.: Identification of Induction Motor Parameters, SPEEDAM'98, Sorrento, June 1998, pp. P3.27-32.
- [6] Szabat, K. - Orłowska-Kowalska, T.: Application of Genetic Algorithms to Parameter Identification of DC Motor Drives, International Conference EDPE'01, High Tatras, Slovakia, October 3-5, 2001, pp. 219-224.
- [7] Žilková, J. - Timko, J. - Fedák, V.: Estimation of Induction Motor Variables based on ANN Utilising Apriori Information. EPE 2001 Conf. Proceedings, Graz, Austria, 2001. (CD)

#### BIOGRAPHY

**Jaroslava Žilková** (Ing., PhD.) received the MSc degree at the Technical University of Košice, at the Department of Technical Cybernetics in 1981. She finished her PhD. thesis in 2001 at the Department of Electrical Drives of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics at TU of Košice. Her research works includes problems mathematical modelling and control of electrical drives and power electronic systems, application of modern control methods, state estimation of induction motor variables with help of neural network.

**Jaroslav Timko** (Prof., Ing., PhD.) he graduated in electrotechnics at Faculty of Electrotechnics of ČVUT Praha. He received his PhD. degree at University of Žilina and full Professor in 1988, at Faculty of Electrical Engineering and Informatics at the Technical University of Košice. His research activities include the modern control strategies for industrial automation.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Acknowledgement. Support of VEGA 1/9033/02 is announced for this work.