

# Samočinne sa nastavujúce regulátory generátora elektromagnetického momentu AM

Michal Abelovský, Milan Žalman, Miroslav Barát

## Úvod

V posledných dvoch desaťročiach dvadsiateho storočia dosiahnutý stupeň vývoja v oblasti výkonovej polovodičovej techniky a mikroprocesorovej techniky umožnil použitie nových algoritmov dynamického riadenia asynchrónneho motora (AM), ako sú vektorové riadenie a priame riadenie momentu a magnetického toku. Dynamické riadenie dosahuje vysokú statickú i dynamickú presnosť riadenia elektromechanických veličín (prúd, magnetický tok, moment, rýchlosť, poloha). Pohony s AM sú vďaka tomu schopné v plnej miere konkurovať jednosmerným servopohonom aj v oblasti polohových systémov pre dynamicky náročné aplikácie (navíjačky, valcovacie stolice, letné nožnice), pričom v porovnaní s JM vynikajú vysokou konštrukčnou spoľahlivosťou a robustnosťou. Aplikácia striedavých servopohonov v rôznych oblastiach priemyselnej automatizácie zaznamenala obrovský nárast, pričom tento trend pretrváva dodnes a v súvislosti s ďalším výrazným zdokonaľovaním technológie striedavých servopohonov určite bude trvať aj naďalej.

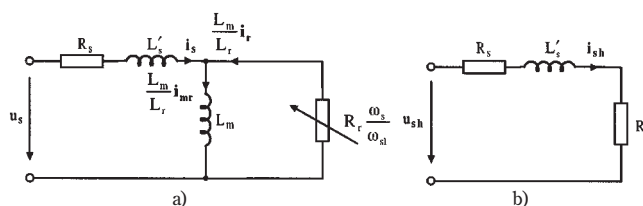
Moderné inteligentné rýchlostné servopohony s AM musia zabezpečiť rýchlu a presnú reguláciu uhlovej rýchlosti motora v dynamickom aj statickom stave. Keďže riadiaci algoritmus využíva model na pozorovanie stavových veličín AM, je nevyhnutné poznať parametre modelu. Identifikované parametre elektromagnetického subsystému AM sa môžu použiť pri samočinne sa nastavujúcich regulátoroch generátora momentu (GM). Parametre sa identifikujú algoritmi off-line alebo on-line. Metódy off-line [3], [4] sú vhodné na použitie pri jednorazovej identifikácii AM pred spustením pohonu. Získajú sa tým parametre, ktoré sú potrebné na nastavenie regulátorov a pozorovateľov stavových veličín AM. Metódy on-line [5], [6] identifikujú parametre meniace sa počas prevádzky pohonu (odpor statora, rotorová časová konštanta, prípadne mechanické parametre). Metódy identifikácie on-line vychádzajú napr. z adaptívneho riadenia s referenčným modelom (Model Reference Adaptive System – MRAS), využívajú Luenbergov pozorovateľ, Kalmanov filter a pod. Identifikácia on-line zvyšuje nároky na výkon riadiaceho procesora. V prvej časti článku budú analyzované vlastnosti a problémy spojené s realizáciou metódy identifikácie rozptylovej indukčnosti  $L'_s$ , vzájomnej indukčnosti  $L_m$  a časovej konštanty rotora  $T_r$  uvedených v článku [1]. V druhej časti bude uvedené využitie identifikovaných parametrov pri realizácii samočinne sa nastavujúcich regulátorov generátora momentu.

## 1. Identifikácia elektromagnetického subsystému AM

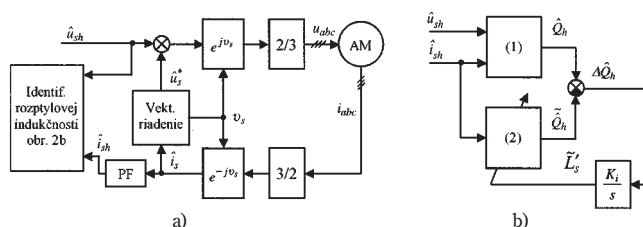
### 1.1 Identifikácia rozptylovej indukčnosti $L'_s$

Identifikácia  $L'_s$  je nezávislá od statorového odporu, pretože vychádza z hodnôt okamžitého reakčného výkonu. Metóda identifikácie  $L'_s$  využíva len merané (resp. rekonštruované) napätia a merané prúdy motora, preto ju možno použiť v štruktúre uzatvoreného (rýchlosť, resp. poloha rotora je snímaná snímačom), ako aj otvoreného (bez snímača rýchlosti) vektorového riadenia.

Metóda vychádza zo zjednodušenia elektrickej náhradnej schémy AM pre vysoké frekvencie  $\omega_h \gg \omega_s$ . Na obr. 1a je náhradná schéma AM v ustálenom stave pri synchronnej uhlovej frekvencii  $\omega_s$ . Pre frekvencie  $\omega_h \gg \omega$  je možné túto náhradnú schému zjednodušiť na schému AM v režime vysokofrekvenčného napájania, obr. 1b.



Obr. 1 Náhradná schéma AM v ustálenom stave



Obr. 2 Principiálna schéma identifikácie rozptylovej indukčnosti

Princíp metódy spočíva podľa obr. 2a v superpozícii VF injektovaneho signálu napätia  $\hat{u}_{sh}$  s referenčným napätím  $\hat{u}_s^*$ . Vysokofrekvenčná zložka vektora prúdu  $\hat{i}_{sh}$  sa získava pásmovým filtrom prúdu – PF. Na identifikáciu  $L'_s$  sa využíva metóda MRAS, obr. 2b. Referenčný model reakčného výkonu (1) je porovnávaný s nastaviteľným modelom (2), chybový signál je spracovaný integračným korekčným členom so zosilnením  $K_i$ .

$$\hat{Q}_h = \Im(\hat{u}_{sh} \cdot \hat{i}_{sh}^*) \quad (1)$$

$$\tilde{Q}_h = \tilde{L}'_s \Im(\hat{s} \hat{i}_{sh} \cdot \hat{i}_{sh}^*) \quad (2)$$

### 1.2 Identifikácia vzájomnej indukčnosti $L_m$ a časovej konštanty rotora $T_r$

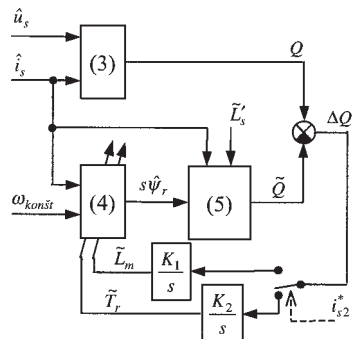
Metódu identifikácie  $L_m$  a  $T_r$  je možné použiť v štruktúre uzatvoreného vektorového riadenia. Metóda využíva referenčný model reakčného výkonu (3) a nastaviteľný model magnetického toku (4), z ktorého sa počíta reakčný výkon (5).

$$\hat{Q} = \Im(\hat{u}_s \cdot \hat{i}_s^*) \quad (3)$$

$$s\hat{\Psi}_r = \left( -\frac{1}{T_r} + j\omega \right) \hat{\Psi}_r + \frac{L_m}{T_r} \hat{i}_s \quad (4)$$

$$\tilde{Q} = \Im(\hat{s} \hat{\Psi}_r \hat{i}_s^* + \tilde{L}'_s \hat{i}_s \cdot \hat{i}_s^*) \quad (5)$$

Do nastaviteľného modelu (4) vstupujú statorové prúdy a uhlová rýchlosť. Nastaviteľnými parametrami sú  $L_m$  a  $T_r$ . Na základe odchýlky hodnôt reakčného výkonu sa v korekčnom člene nastavuje parameter  $L_m$  a  $T_r$ . Identifikácia  $L_m$  prebieha pri nezaťaženom



Obr.3 Bloková schéma metódy identifikácie  $L_m$  a  $T_r$

motore, vtedy je želaná hodnota zložky prúdu  $i_{s2}^*$  nulová. Identifikácia  $T_r$  resp.  $1/T_r$  prebieha pre nenulovú hodnotu prúdu  $i_{s2}^*$ .

V prípade, ak budeme považovať indukčnosť statora a rotora za rovnaké, je možné zo vzťahu pre rozptyl vypočítať indukčnosť statora a rotora (6), a teda pri identifikácii  $L'_s$  a  $L_m$  môžeme identifikovať aj tieto indukčnosti.

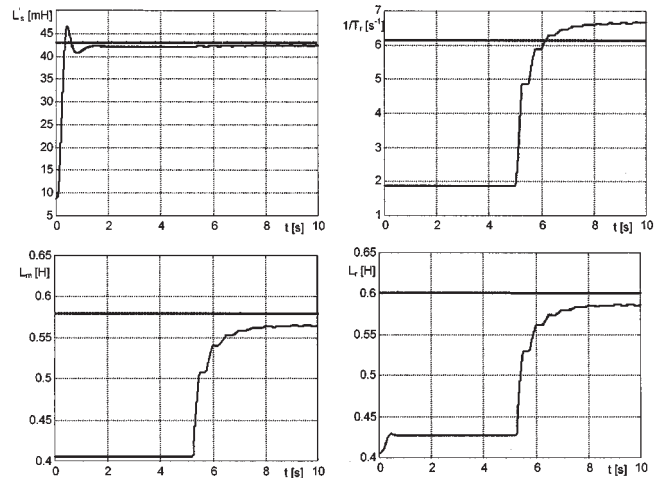
$$L_r = L_s = \frac{L'_s + \sqrt{L'_s{}^2 + 4L_m^2}}{2} \quad (6)$$

### 1.3 Analýza realizácie metódy identifikácie $L'_s$ , $L_m$ a $T_r$

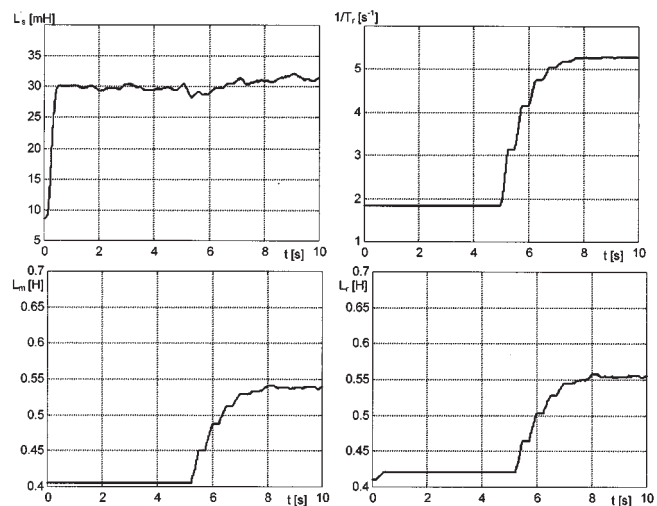
Simulácie a experimenty boli robené na 1,1 kW AM, ktorého parametre sú v tab. 1. Schéma simulácie pozostávala zo spojitých častí (model AM) a z diskretnej časti (riadenie a identifikácia). V simulácii nebola zahrnutá modulácia PWM. Veľkosť amplitúdy injektovaného VF napätia  $\hat{u}_{sh}$  neovplyvňuje presnosť identifikácie, ovplyvňuje len jej dynamiku. Amplitúda napätia je zvolená  $\hat{u}_{sh} = 8$  V. V článku [7] bola skúmaná presnosť identifikácie pre rôzne hodnoty frekvencie  $\hat{u}_{sh}$  pri rôznych periódach vzorkovania a uhlových rýchlostiach motora. Zmeny uhlovej rýchlosti vplyvajú na presnosť identifikácie tým viac, čím je frekvencia  $f_c$  injektovaného napätia  $\hat{u}_{sh}$  menšia. Je to spôsobené tým, že napr. pri nízkych frekvenciách  $f_c$  nie je splnená podmienka  $\omega_h \gg \omega_s$ . Presnosť identifikácie sa zvyšuje aj zmenšovaním periódy vzorkovania  $T$ . Pásmový filter 2. rádu typu Butterworth bol navrhnutý v Matlabe. Bol skúmaný aj vplyv rádu a typu filtra. Pásmové filtre 1., 2. aj 3. rádu z hľadiska presnosti identifikácie dávali prakticky zhodné výsledky. Na presnosť identifikácie vplyva aj moment záťaže. Chyba identifikácie parametra je však významná iba pri malej frekvencii  $f_c$  a veľkej perióde vzorkovania.

Frekvencia  $f_c$  je 260 Hz a perióda vzorkovania je  $T = 500 \mu s$ . Tieto hodnoty boli zvolené vzhľadom na obmedzenie výkonu vývojového systému DS 1102, na ktorom sú realizované experimenty. Zosilnenie integrátora  $K_i = 0,1$ .

Simulácie a experimenty budú prebiehať nasledovným spôsobom: najprv sa pohon nabudí magnetickým tokom rotora 0,7 Wb, pričom uhlová rýchlosť je  $70 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ . Po dvoch sekundách sa spustí identifikácia  $L'_s$ . Po ďalších piatich sekundách sa spustí identifikácia parametrov  $L_m$  a  $1/T_r$ . Ich počiatočné hodnoty sú stanovené na 70, resp. 30 % správnej hodnoty. Algoritmus spoľahlivo funguje (je stabilný) pri ľubovoľných nenulových počiatočných podmienkach týchto parametrov, podľa nastavenia zosilnení integrátorov sa však líši doba konvergenencie. Zosilnenie integrátorov je nastavené nasledovne:  $K_1 = 0,8$  a  $K_2 = 9,5$ . Prepínanie režimu činnosti AM medzi prácou so záťažou a bez nej je zabezpečené obdĺžnikovými skokmi želaných hodnôt momentu motora z 0 na 2 Nm s periódou



Obr.4 Časové priebehy identifikovaných parametrov AM pri  $T = 500 \mu s$  a  $f_c = 260$  Hz, simulačný experiment



Obr.5 Časové priebehy identifikovaných parametrov AM pri  $T = 500 \mu s$  a  $f_c = 260$  Hz, experiment na reálnom zariadení

0,5 s. V čase 10 s od začiatku identifikácie prvého parametra je identifikácia ukončená. V priebehoch bude zobrazených týchto 10 s identifikácie (t. j. počiatočné prechodové javy sú vynechané). Na obr. 4 sú priebehy identifikovaných parametrov AM.

Chyba  $T_r$ , až v 8 % je zapríčinená nepresnosťou metódy vyplývajúcej z použitia príliš veľkej periódy vzorkovania a malej frekvencie  $f_c$  VF. zložky. V ideálnom prípade pri  $T = 50 \mu s$  a  $f_c = 660$  Hz sú tieto chyby menšie ako 1 % [7]. Na presnosť metódy výrazne vplyva fázový posun medzi meraným a skutočným prúdom a meranými resp. rekonštruovanými a skutočnými napätiami. Nepresnosť sa zvyšuje s oneskorením vstupného prúdového signálu.

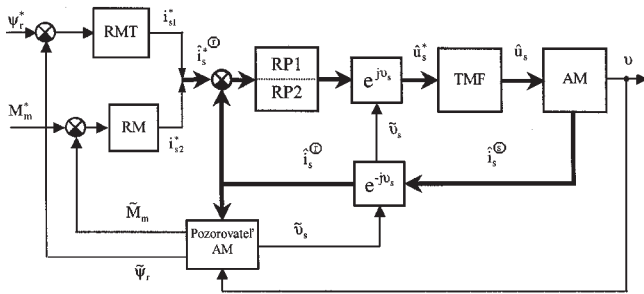
Na obr. 5 sú zobrazené experimentálne výsledky identifikácie parametrov AM pri  $T = 500 \mu s$  a  $f_c = 260$  Hz. Experimenty boli realizované na vývojovom prostredí dSPACE DS 1102.

## 2. Návrh samočinne sa nastavujúcich regulátorov generátora momentu

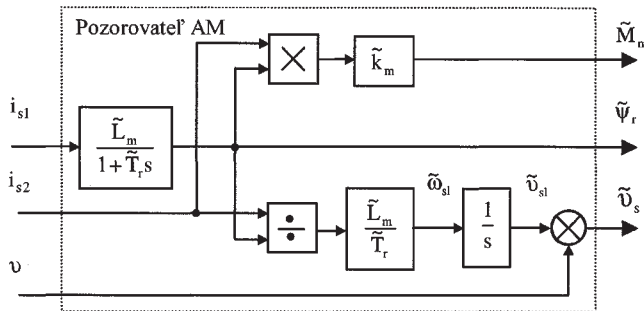
Štruktúra generátora momentu servopohonu pri priamom vektorovom riadení AM je na obr. 6. GM obsahuje PI regulátory tokotvornej  $i_{s1}$  (RP1) a momentotvornej  $i_{s2}$  (RP2) zložky prúdu, regulátor magnetického toku (RMT) a regulátor momentu motora (RM).

$P_n = 1,1 \text{ kW}$	$R_s = 7,61 \Omega$	$L_s = 0,602 \text{ H}$	$L_m = 0,58 \text{ H}$	$J = 0,004 \text{ kgm}^2$
$n = 2840 \text{ min}^{-1}$	$R_r = 3,70 \Omega$	$L_r = 0,602 \text{ H}$	$L'_s = 0,043 \text{ H}$	$p' = 1$

Tab.1 Parametre AM



Obr.6 Bloková schéma generátora momentu pri priamom vektorovom riadení



Obr.7 Pozorovateľ stavu AM

Syntéza regulátorov GM metódou inverznej dynamiky je podrobne uvedená v článku [2]. Samočinne sa nastavujúce regulátory sú založené priamo na uvedenej metóde, pričom parametre AM, ktoré vstupujú do výpočtu parametrov jednotlivých regulátorov, sú nahradené identifikovanými parametrami. To si vyžiada zmenu statických výpočtov parametrov regulátorov na výpočty dynamické, prebiehajúce každú periódu vzorkovania, čo pri praktickej realizácii mierne zvýši výpočtové zaťaženie dosky s DS 1102. Použitá perióda vzorkovania  $T = 500 \mu s$  však poskytuje dostatočnú rezervu výpočtového výkonu v takomto prípade. Vzorce na výpočet jednotlivých parametrov regulátorov GM metódou inverznej dynamiky sú uvedené na obr. 8.

Časy nábehu oboch zložiek prúdu  $T_{wp}$ , magnetického toku  $T_{wmt}$  a momentu  $T_{wmom}$  sú zvolené s ohľadom na dynamiku obvodu. Ak v týchto vzťahoch nahradíme hodnoty parametrov  $L'_s, L_m, L_r$  a  $T_r$  priebežne identifikovanými hodnotami, dostaneme vzťahy parametrov regulátorov v závislosti od okamžitých hodnôt parametrov AM:

$$K_p = \frac{2 \left( R_s + \frac{\tilde{L}_m^2}{\tilde{L}_r \tilde{T}_r} \right) T_{ip}}{2T_{wp} + T} \quad (7)$$

$$K_{mt} = \frac{2T_{imt}}{\tilde{L}_m(2T_{wmt} + T)} \quad (8)$$

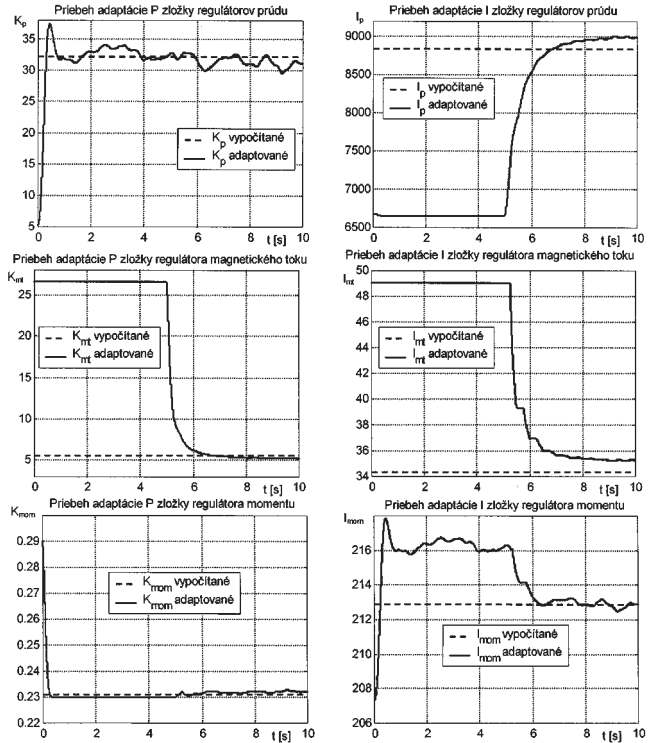
$$K_{mom} = \frac{4T_{imom} \tilde{L}_r}{3p' \tilde{L}_m(2T_{wmom} + T)} \quad (9)$$

$$T_{ip} = \frac{\tilde{L}'_s}{\left( R_s + \frac{\tilde{L}_m^2}{\tilde{L}_r \tilde{T}_r} \right)} - \frac{T}{2} \quad (10)$$

regulátory	proporcionálna zložka	integračná časová konštanta	dynamika
RP1, RP2	$K_p = \frac{2R_s T_{ip}}{2T_{wp} + T}$	$T_{ip} = T_i - \frac{T}{2}$	$T_{wp} = 0,001 s$
RMT	$K_{mt} = \frac{2T_{imt}}{\tilde{L}_m(2T_{wmt} + T)}$	$T_{imt} = T_r - \frac{T}{2}$	$T_{wmt} = 0,05 s$
RM	$K_{mom} = \frac{4T_{imom} L_r}{3p' \tilde{L}_m(2T_{wmom} + T)}$	$T_{imom} = \frac{L'_s}{K_p} - \frac{T}{2}$	$T_{wmom} = 0,003 s$

kde  $R_1 = R_s + \frac{L_m^2}{L_r T_r}$  a  $T_1 = \frac{L'_s}{R_1}$

Obr.8 Výpočet parametrov regulátorov generátora momentu

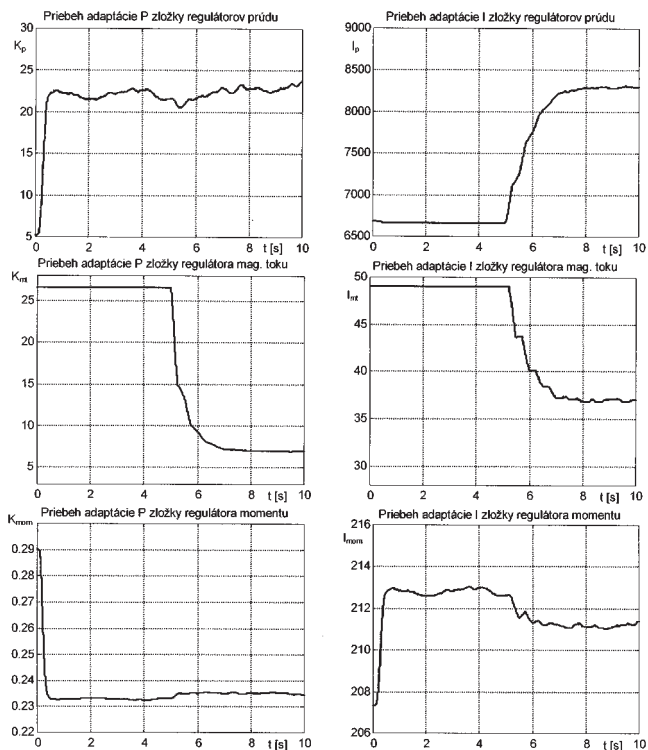


Obr.9 Experimentálne výsledky samočinného nastavenia parametrov regulátorov GM na simulačnom modeli

$$T_{imt} = \tilde{T}_r - \frac{T}{2} \quad (11)$$

$$T_{imom} = \frac{\tilde{L}'_s}{K_p} - \frac{T}{2} \quad (12)$$

Simulačné priebehy samočinne sa nastavujúcich parametrov regulátorov sú na obr. 9. Samočinne sa nastavujúce regulátory boli zapojené do regulačného obvodu a využívali sa na riadenie. Hodnoty jednotlivých parametrov konvergujú k vypočítaným hodnotám, pričom chyba parametra závisí od chyby identifikácie parametrov AM. Výsledky experimentov na obr. 10 potvrdzujú konvergenciu parametrov aj na reálnom zariadení.



Obr.10 Experimentálne výsledky samočinného nastavenia parametrov regulátorov GM na reálnom zariadení

## Záver

Z experimentálnych výsledkov na simulačnom modeli a reálnom zariadení vyplýva, že na presnosť identifikácie vplyva veľkosť periódy vzorkovania a frekvencia VF injektovaného napätia  $\hat{u}_{sh}$ . Na presnosť tiež vplyva fázový posun medzi meranými a skutočnými prúdmi a meranými, resp. rekonštruovanými a skutočnými napätiami.

Simulačné aj experimentálne výsledky metódy samočinne sa nastavujúcich regulátorov GM, dosiahnuté v druhej časti článku, dávajú dobrý predpoklad na rozšírenie metódy o samočinne sa nastavujúci regulátor rýchlosti. Realizácia tohto samočinne sa nastavujúceho regulátora rýchlosti by si však vyžadovala rozšírenie identifikácie aj o parametre mechanického subsystému AM, ako napr. o moment zotrvačnosti a moment záťaže.

## Literatúra

- [1] NOGUCHI, T., KONDO, S., TAKAHASHI, I.: Field-Oriented Control of an Induction Motor with Robust On-Line Tuning of Its Parameters. IEEE Trans. on Ind. Appl., Jan/Feb 1997. Vol. 33, No. 1, pp. 35 - 42.
- [2] ŽALMAN, M., JOVANKOVIČ, J.: Syntéza regulátorov vektorovo riadeného asynchrónneho motora metódou inverznej dynamiky. AT&P journal, 5 (1998), č. 2, str. 70 - 73.
- [3] SEOK, J. K., SUL, S. K.: Induction Motor Parameter Tuning for High-Performance Drives. IEEE Trans. on Ind. Appl., Jan/Feb 2001. Vol. 37, No. 1, pp. 35 - 41.

[4] LIN, Y. N., CHEN, C. L.: Automatic IM Parameter Measurement Under Sensorless Field-Oriented Control. IEEE Trans. on Ind. Electr., Feb 1999, Vol. 46, No. 1, pp.: 111 - 117.

[5] AKATSU, K., KAWAMURA, A.: Sensorless Very Low-Speed and Zero-Speed Estimations with Online Rotor Resistance Estimation of Induction Motor Without Signal Injection. IEEE Trans. on Ind. Appl., May/June 2000. Vol. 36, No. 3, pp.: 764 - 770

[6] ZAMORA, J. L., CERRADA, A. G.: Online Estimation of the Stator Parameters in an Induction Motor Using Only Voltage and Current Measurements. IEEE Trans. on Ind. Appl., May/June 2000, Vol. 36, No. 3, pp.: 805 - 816.

[7] ABELOVSKÝ, M., BARÁT, M., ŽALMAN, M.: Identifikácia parametrov asynchrónneho motora. Kybernetika a informatika. Trebišov, september 2002, s. 65 - 67.

**Ing. Michal Abelovský**  
**prof. Ing. Milan Žalman, PhD.**  
**Ing. Miroslav Barát**

**Katedra automatizácie a regulácie FEI STU**  
**Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava**  
**Tel.: 02/60 29 14 78**  
**e-mail: Michal.Abelovsky@elf.stuba.sk**  
**zalman@elf.stuba.sk**

41