

# Nové trendy v riadení lineárnych pohonov

Milan Žalman, Ján Jovankovič

## Úvod

K veľkému rozvoju výroby a praktickému uplatneniu lineárnych motorov elektromagnetického typu – LM došlo až v posledných desiatich rokoch napriek tomu, že princípy konštrukcie sú známe rovnako dlho ako princípy rotačných strojov. Vynálezca princípu indukčného LM bol Angličan Charles Wheatson r. 1841 [1].

S cenovo prístupnými permanentnými magnetmi – PM predovšetkým typu Nd-Fe-B nastali zásadné zmeny pri posudzovaní použiteľnosti LM. Výrazne vzrástol význam pohonov so synchronnými LM s PM. Použitie indukčných LM sa v týchto prípadoch obmedzuje pre menej náročné aplikácie, kde má význam predovšetkým jednoduchosť a robustnosť stavby ILM, napr. neštandardné prevádzkové prostredie, vlhké, znečistené, teplé, kde vzniká možnosť mechanického poškodenia stroja.

Lineárne pohony prenikajú do oblasti vysokorychlostných obrábacích strojov, [2], [3], napr. frézovacie centrá, vertikálne obrábacie centrá, univerzálne sústruhy, prestrihovacie stroje, energolúčové rezacie stroje. Synchronné LM s PM majú v tejto oblasti podstatne väčšiu aplikovateľnosť ako asynchronné LM. Záujem o lineárny pohon narastá najmä u výrobcov strojov na elektroeróziu, opracovanie, manipulačných prostriedkov, polohovacích mechanizmov a pod. Najbežnejšie oblasti využitia LM s PM bez železa je elektrotechnická a elektronická výroba, kde sa využíva ako pohon na osadzovacie stroje, manipulačnú, polohovaciu a polygrafickú techniku. LM s PM bez železa sa uplatňujú tam, kde je potrebný presný pohyb malých hmôt s veľkým počtom taktov a kde musí výrobný proces prebiehať dlhodobo vo vysokej a opakovateľnej kvalite. V posledných rokoch podľa [2] bolo lineárnymi pohonmi vybavených 3 500 obrábacích strojov. Predpokladá sa, že predaj lineárnych pohonov vzrastie ročne o 20 až 30 %.

LM podľa princípu činnosti a konštrukcie rozdelujeme do týchto kategórií:

1. jednosmerné,
2. asynchronné,
3. synchronné:
  - a) s primárnou časťou bez feromagnetických materiálov,
  - b) s feromagnetickými materiálmi.

Medzi lineárne motory patria aj piezoelektrické LM [1].

Základné vlastnosti LM s PM možno charakterizovať takto:

Výhody oproti rotačným motorom s prevodovkou:

- vyššia dynamika a väčší rozsah regulácie,
- väčšie rýchlosti posuvu,
- vyššia presnosť polohovania,
- možnosti klasických rotačných motorov s mechanickým prevodom z rotačného pohybu na lineárny sú na hraniciach možnosti dané pružnosťou a mechanickými vôľami a postupným opotrebovaním,
- takmer bezporuchová prevádzka,
- prevádzka s LM nie je nebezpečná pre životné funkcie obsluhy z hľadiska EMC.

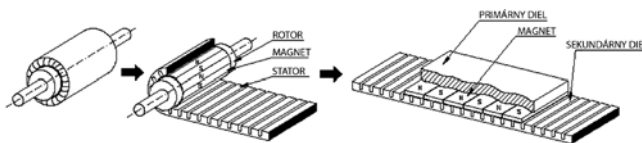
Nevýhody LM s PM:

- s dlhšou dráhou je drahší ako rotačný motor s prevodovkou s porovnateľným výkonom,

- zachytáva relatívne veľké príťažné sily medzi primárnym a sekundárnym dielom,
- treba riešiť mechanické vedenie a prívod energie primárnej časti LM.

## 1. Konštrukčné usporiadanie lineárnych motorov

Lineárny motor si môžeme predstaviť ako klasický synchronný alebo asynchronný motor rozvinutý do roviny tak, ako je to ukázané na obr. 1 [10].



Obr.1 Principiálne konštrukčné usporiadanie lineárneho motora

Stator lineárnych motorov sa spravidla označuje ako primárny diel a rotor sekundárny diel. Primárny diel je tvorený rovnako ako pri klasických strojoch feromagnetickým zväzkom zloženým z elektrotechnických plechov a trojfázového vinutia uloženého v jeho drážkach. Lineárne synchronné motory majú oproti primárnemu dielu konštrukčne usporiadanú sekundárnu časť tvorenú permanentnými magnetmi zo vzácnych zemín (Nd-Fe-B), ktoré sú nalepené na oceľovú podložku. Asynchronná verzia má sekundárny diel vytvorený klieťkou nakrátko uloženú buď do drážok feromagnetického zväzku, alebo aspoň pripevnenú na oceľovú podložku poháňaného zariadenia. Vo väčšine konštrukcií sa pohybuje primárna časť po dráhe vytvorenej ľubovoľným počtom sekundárnych dielov. Toto usporiadanie vyžaduje pohyblivý napájací kábel, kábel snímača polohy a ak je použité vodné chladenie, tak aj pohyblivý prívod a odvod chladiacej kvapaliny.

Základné prvky lineárneho pohonu sú vlastný motor a menič frekvencie. K týmto častiam pristupujú ešte mechanické vedenie, prídavné chladiče, zabezpečovacie prvky. Pretože väčšinu lineárnych pohonov tvoria servopohony, patrí k pohonu ešte aj riadiaci systém, obsahujúci najmenej regulátor a snímač polohy. Niektoré z uvedených častí patria priamo poháňanému zariadeniu a plnia súčasne niekoľko funkcií – napr. mechanického vedenia, meracieho (snímač polohy) a zabezpečujúcich prvkov ako mechanických dorazov, koncových funkčných a havarijných spínačov, mechanických krytov. Väčšinou sa lineárne motory dodávajú ako zabudované diely a spoločne s príslušenstvom tvoria stavebnicu.

### Mechanické vedenie

Mechanické vedenie musí spĺňať dve základné podmienky: statickú a dynamickú únosnosť a požadovanú rýchlosť posuvu. Orientačne možno uviesť nasledujúce odporúčania pre voľbu mechanického vedenia:

- Klzné kovové plochy so šmykovým trením sú vhodné pre rýchlosť do 0,5 m/s.
- Gulôčkové puzdrá so šmykovým trením vyhovujú do 1 m/s.
- Lineárne gulôčkové alebo valčekové ložiská s valivým trením umožňujú rýchlosť posuvu do 10 m/s.
- Keramické klzné plochy nasýtené napr. teflónom dovoľujú rýchlosť až do 20 m/s.

- Vzduchové ložiská a levitačné systémy sú určené pre rýchlosti až do 100 m/s. [5], [6]

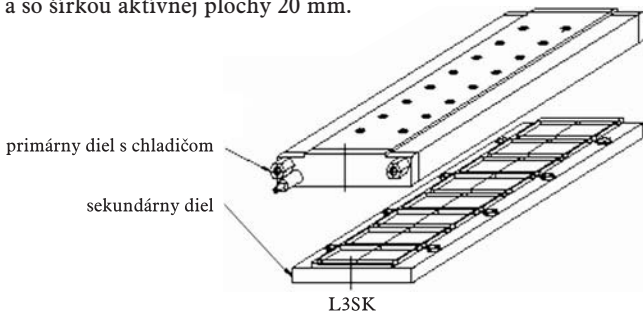
### Meracie systémy

Meracie systémy sú zväčša inkrementálne a pracujú na reluktančnom, magnetickom alebo fotoelektrickom princípe. Reluktančné a magnetické snímače sú tvorené snímacou magnetickou hlavičkou a nosnou páskou s požadovanou dĺžkou s tenkou záznamovou vrstvou nesúcou informáciu o polohe (magnetickú mriežku). Optické snímače majú na nosnej kovovej páske vypálený systém rýsiel z rozstupom 20 alebo 40  $\mu\text{m}$ . Snímacia hlavička sa skladá zo svetelného zdroja, snímačej optickej sústavy zameranej na signál odrazený od pásky a z elektronického tvarovacieho obvodu.

### Synchronne lineárne motory s PM

Synchronne lineárne motory s PM sú konštrukčne riešené ako trojfázové s rozloženým vinutím na primárnej časti, budenej permanentnými magnetmi typu Nd-Fe-B, ktoré sú súčasťou sekundárnej časti. Motory sú prispôbené na napájanie z vektorovo riadených meničov frekvencie. Za výrobný štandard sa považujú motory napájané z meničov, ktorých napätie jednosmerného medziobvodu Udc je 120, 350, 560 V. Všeobecne sú lineárne motory projektované podobne ako servomotory skôr pre dynamické procesy s veľkým rozsahom rýchlosti posunu a premenlivou záťažou ako pre trvalé zataženie S1 s konštantným zatažením a konštantnou rýchlosťou. Preto môžu byť motory zaťažované podstatne väčšími silami (prúdmi) ako menovitými, ak ich stredná efektívna hodnota neprekročí menovitú hodnotu pre trvalú záťaž S1.

Primárny diel je kompaktný celok s vinutím a magnetickým obvodom zaliatym do plastu. V prípade konštrukcie s chladičom je spoločne s vinutím a magnetickým obvodom zaliata aj špeciálna konštrukcia vodného chladiča (obr. 2). Sekundárne diely možno skladať do potrebnej dĺžky posuvu. Magnety sú chránené pred mechanickým poškodením a pred vplyvom prostredia tým, že sú zaliate do plastu. V kompaktnom vyhotovení sú lineárne motory so silou 50 až 16 000 N, rýchlosťou posuvu od 0,01 mm/s do 15 m/s a so šírkou aktívnej plochy 20 mm.



Obr.2 Pohľad na konštrukčné usporiadanie – kompaktné vyhotovenie LM

### Parametre modelu LM

Základné parametre LM uvádza výrobca v katalógoch, ktoré sú potrebné pre statický a dynamický návrh pohonu. V ďalšej časti je uvedený výpočet parametrov dynamického modelu LM. Elektromagnetická časová konštanta je vypočítaná z fázových hodnôt

$$\tau_{el} = \frac{L_f}{R_f} \quad (1)$$

Pre zapojenie do hviezdy Y je

$$R_{U-V} = 2 \cdot R_f \quad L_{U-V} = \sqrt{3} \cdot L_f \quad (2)$$

Pre zapojenie do trojuholníka  $\Delta$  platí

$$R_{U-V} = \frac{2}{3} \cdot R_f \quad L_{U-V} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}+1} \cdot L_f \quad (3)$$

Prepočet medzi rotačnými a lineárnymi veličinami parametrov modelu LM s PM z katalógových údajov:

### Príklad:

- lineárny motor L3SK 100P-4815-JH, výrobca VUES Brno
- postupná rýchlosť  $v_m = 4,3 \text{ ms}^{-1}$  pri výstupnej frekvencii meniča ( $f_s = 134 \text{ Hz}$ )
- napäťová konštanta  $K_E = 65 \text{ Vsm}^{-1}$
- silová konštanta  $K_F = 113 \text{ NA}^{-1}$

### Silová konštanta

$$K_F = \frac{F_m}{I_{q\_ef}} \quad (4)$$

kde  $F_m$  je sila motora,

$I_{q\_ef}$  – efektívna hodnota zložky statorového prúdu.

Pri vektorovom riadení platí  $i_q = i_s$ .

Efektívna hodnota prúdu

$$I_{s\_ef} = I_s / \sqrt{2}$$

kde  $I_s$  je modul, amplitúda statorového prúdu

### Napäťová konštanta

$$K_E = \frac{U_{i\_ef}}{v_m} = \frac{u_i}{v_m \sqrt{2}} \rightarrow u_i = \sqrt{2} K_E v_m = K_{Em} v_m \quad (5)$$

kde  $U_{i\_ef}$  je efektívna hodnota indukovaného napätia motora,

$v_m$  – mechanická rýchlosť motora.

Prevodová konštanta medzi rotačnými a lineárnymi veličinami

$$K_x = \frac{\omega_s}{v_m} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s}{v_m} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 134}{4 \cdot 3} = 195,8 \text{ rad/m} \quad (6)$$

Z fyzikálnej interpretácie platí tento vzťah medzi rotačnými a lineárnymi veličinami

$$v_m = 2 \tau_p f_s \quad (7)$$

kde  $\tau_p$  je pólový rozstup (m),

$f_s$  – frekvencia napájacieho zdroja (Hz) – sieť.

Pólový rozstup možno vypočítať zo vzťahu

$$\tau_p = \frac{v_m}{2 f_s} = \frac{4,3}{2 \cdot 134} \cong 16 \text{ mm} \quad (8)$$

## 2. Dynamický model lineárneho SM motora s PM

Dynamický model lineárneho SM s PM v súradnicovom systéme orientovanom na rotor ( $d, q$ ) možno získať úpravou modelu rotačného motora [8]. Pre zložky vektora magnetického toku statora platia vzťahy

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d i_d + L_{md} i_f \\ \Psi_f &= L_{md} i_f \quad \Psi_q = L_q i_q \end{aligned} \quad (9)$$

Predpokladáme, že indukčnosti v pozdĺžnej a priečnej osi modelu LM s PM sú zhodné.

$$L = L_d = L_q \quad (10)$$

Medzi rotačnými a lineárnymi veličinami platí vzťah

$$K_x = \frac{\omega}{v_m} \rightarrow \omega = K_x v_m \quad \text{ak} \quad \omega = \omega_s \quad (11)$$

Po dosadení získame napäťové rovnice statora LM v tvare

$$\begin{aligned} u_d &= R i_d + L \frac{d i_d}{dt} - K_x L v_m i_q \\ u_q &= R i_q + L \frac{d i_q}{dt} + K_x L v_m i_d + K_x \Psi_f v_m \end{aligned} \quad (12)$$

Definujeme napäťovú konštantu

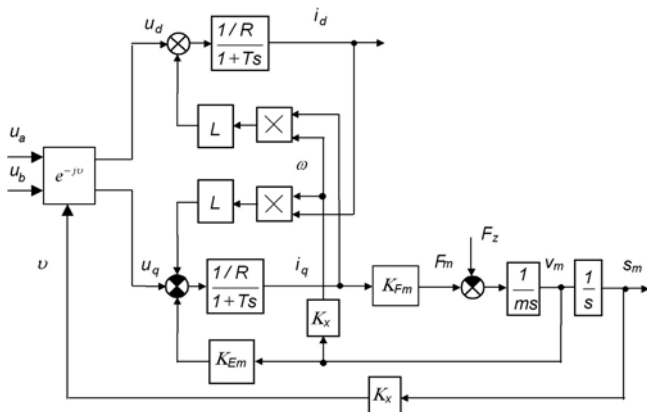
$$K_{Em} = K_x \Psi_f \quad (13)$$

potom

$$\begin{aligned} u_d &= R(1 + Ts) i_d - K_x L v_m i_q \\ u_q &= R(1 + Ts) i_q + K_x L v_m i_d + K_{Em} v_m \end{aligned} \quad (14)$$

kde  $T = L/R$





Obr.3 Bloková schéma dynamického modelu LM PM1 v rovine (d, q)

Pre silu motora pri vektorovom spôsobe riadenia platí vzťah

$$F_m = K_F i_{q\_ef} = \frac{K_F}{\sqrt{2}} i_q = K_{Fm} i_q \quad (15)$$

Pohybová rovnica mechanického systému motora

$$F_m - F_z = m \frac{dv_m}{dt} \quad v_m = \frac{ds_m}{dt} \quad (16)$$

Matematický model synchronného LM PM je vyjadrený blokovou schémou na obr. 3.

### 3. Riadiaci systém polohového servopohonu LM s PM

V riadiacom systéme polohového servopohonu sa takmer výhradne používajú číslicové regulátory. Realizujú sa inteligentné polohové striedavé servopohony s vektorovou reguláciou. V niektorých prípadoch sú vložené ešte regulačné slučky zrýchlenia a pásmové filtre pre zlepšenie mechanickej stability. Vyžaduje sa procesor s vysokou operačnou rýchlosťou a interpolátor. Komunikácia medzi riadiacim systémom a LM je obojsmerná. Okrem elektrických (napätie, prúdy) a mechanických veličín (poloha) možno merať aj teplotu, vypadnutie zo synchronizmu a pod.

#### Generátor sily LM PM

Základné jadro regulačnej štruktúry polohového servopohonu tvorí generátor sily, realizovaný na princípe vektorového frekvenčno-prúdového riadenia synchronných motorov s PM (obr. 4). Obsahuje RP1, RP2 – regulátory prúdu, KB – kompenzačný blok,  $e^{j\omega}$ ,  $e^{-j\omega}$  – vektor – rotátory, IRC – inkrementálny snímač polohy  $SP_a$ ,  $SP_b$  – snímače prúdu fázy a, b.

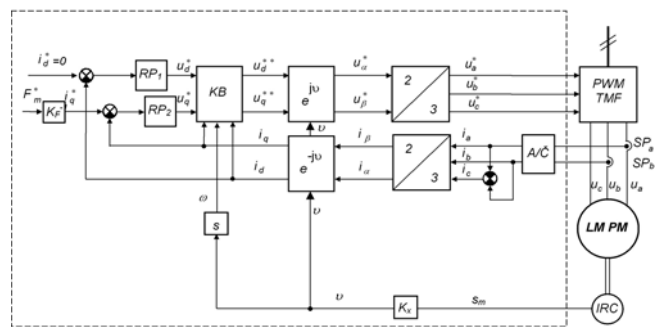
#### Regulačný obvod polohy

Polohový servopohon môže byť realizovaný s kaskádovo radenými regulátormi rýchlosti RR (najčastejšie PI) a regulátorom polohy (P regulátor). Bloková schéma je uvedená na obr. 5. Na náročné dynamické riadenie sú vhodnejšie algoritmy riadenia polohového systému odvodené zo stavového riadenia, [7], [9], tzv. PIV algoritmy riadenia, obr. 6.

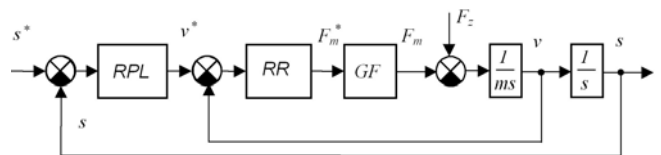
Ako príklad možno uviesť výsledky simulačného experimentu polohového servopohonu s PIV algoritmom riadenia, želaná hodnota polohy je generovaná v štvorrozmernom Master generátore 4D. [9] Polohovanie na zmenu polohy  $s_m = 2$  m maximálnou rýchlosťou  $v_{max} = 4$  m/s a s hmotnosťou  $m_{o1} = 125$  kg, obr. 7.

#### Bezpečné riadenie lineárneho pohonu

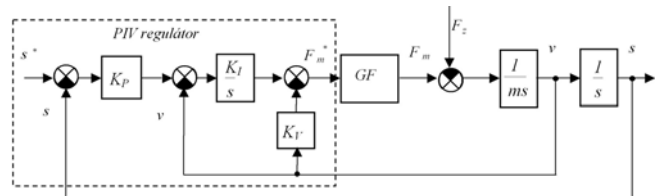
V súčasnej koncepcii strojov hlavne s lineárnymi pohonmi sa ochrana osôb zaisťuje rôznymi spôsobmi. Na bezpečné zastavenie sa používajú napr. stýkače zapojené v sieťovom prívode či vedení k motoru. Nevýhodou sú čakacie časy pri opätovnom spustení, obmedzená životnosť komponentov a nároky na priestor. Pri ro-



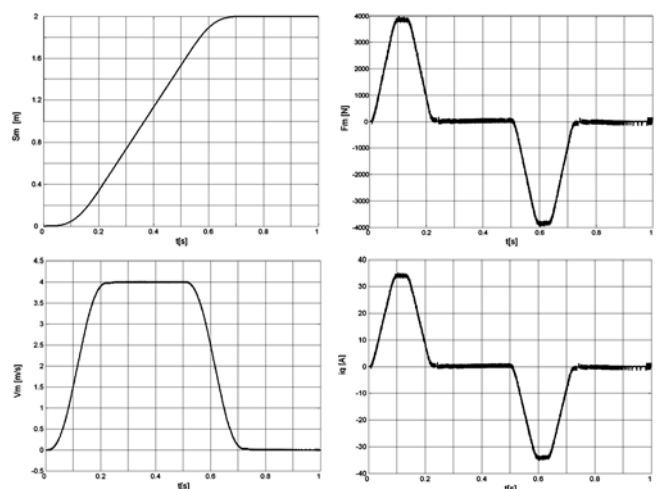
Obr.4 Bloková schéma zapojenia generátora sily LM PM s riadením silovej  $i_q$  a tokovej zložky prúdu  $i_d$



Obr.5 Bloková schéma polohového servopohonu s kaskádovo radenými regulátormi rýchlosti a prúdu



Obr.6 Bloková schéma regulačného obvodu polohy s PIV regulátorom



Obr.7 Priebehy stavových veličín polohového servopohonu pri zmene polohy  $s_m = 2$  m

botoch sa obvykle používa nájazd do bezpečnej pozície. Aj tu však spôsobuje časové straty.

Nové koncepcie dvojkanálového prerušenia [4] prívodu energie do pohonu (blokovanie rozbehu) sú pokrokovejšie. Použitím nového riadiaceho systému pohonov môžu výrobcovia zariadení navrhovaným nevýhodám zabrániť. Integrované bezpečnostné riadiace prvky spĺňajú bez obmedzení požiadavky európskych noriem. Priamo v pohone možno voliť tieto funkcie:

- bezpečné zastavenie,
- bezpečné prevádzkové zastavenie,
- bezpečné blokovanie pohonu,
- bezpečne redukovaná rýchlosť,
- bezpečne obmedzovaná maximálna rýchlosť,
- bezpečná obmedzená dĺžka kroku,
- bezpečne obmedzený absolútny rozsah polohy,
- bezpečne obmedzená absolútna koncová poloha,



- bezpečný smer otáčania,
- bezpečný manažment brzdy,
- bezpečné držanie – ochranné zábrany.

Bezpečnosť integrovaná priamo v pohone má oproti konvenčným konštrukciám mnoho výhod:

- Vďaka autonómnemu riadeniu v pohone sa dosahuje veľmi krátky reakčný čas. To je nutná podmienka na ochranu osôb pri vysokodynamických aplikáciách, najmä lineárnych motorov. Takéto pohony môžu za menej než 100 ms zrýchliť až na maximálnu rýchlosť, takže externé dohliadacie zariadenia sú pre dlhé reakčné časy do veľkej miery nepoužiteľné.
- Vedľa bezpečného zastavenia sa vykonáva tiež bezpečný pohyb. Používateľ môže pri testovaní alebo nastavovaní používať bezpečnú redukovanú rýchlosť alebo bezpečnú veľkosť kroku, a to bez externého dohliadacieho zariadenia.
- Vďaka autonómnej realizácii bezpečnostných funkcií v pohone je používateľ nezávislý od nadradeného systému.

## Záver

V článku sú uvedené hlavné trendy rozvoja LM v posledných rokoch. Pozornosť sa sústreďuje na problematiku polohového servopohonu synchronného lineárneho motora s permanentnými magnetmi. Odvodený je dynamický model LM PM, ktorého parametre sú vypočítané z dostupných katalógových údajov výrobcu (VUES Brno). Základnou štruktúrou systému je generátor sily, ktorý je realizovaný na princípe vektorového frekvenčno-prúdového riadenia synchronných motorov s PM. Dôležitosť výberu vhodných nadradených obvodov riadenia systému dokumentujú dve vybrané štruktúry, kaskádová a PIV algoritmus riadenia. V závere sú uvedené niektoré dôležité informácie pre návrh a realizáciu bezpečného riadenia strojov s LM.

## Literatúra

- [1] ROUBÍČEK, O.: Tendence vývoje v oblasti průmyslových elektrických lineárních pohonů. In: Elektro, č. 3, 4, 2004.
- [2] HOLUB, G.: Lineární pohony i v obráběcích strojích. In: Elektro, č. 2/2003.
- [3] HOLUB, G.: Elektrické pohony a veltrh SPS/IPC/DRIVES. In: Elektro, č. 3/2003.
- [4] NOVOTNÝ, R.: Bezpečnost integrovaná v pohonu. In: Auto-ma, č. 3/2004.
- [5] MAYER, D.: Nové možnosti magnetické levitace v dopravě? In: Elektro, č. 12/2003.
- [6] MAYER, D.: Magnetická levitace a její využití. In: Elektro, č.1/2003.
- [7] LORENZ, R. D., LIPO, T. A., NOVOTNY, D. W.: Motion control with induction motors. Proceedings of the IEEE, vol. 82, No 8, august 1994.
- [8] ŽALMAN, M.: Akčné členy. STU, Bratislava 2003.
- [9] ŽALMAN, M., JOVANKOVIČ, J., URIČEK, M.: Master-Slave riadenie polohových servopohonov. In: ATP journal č. 2, 3, 4, 2005.
- [10] www.vues.cz

**prof. Ing. Milan Žalman, PhD.**  
**Ing. Ján Jovankovič, PhD.**

40

**Slovenská technická univerzita**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra automatizácie a regulácie**  
**Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava**  
**e-mail: milan.zalman@stuba.sk**