

Tridsať rokov svetovej robotiky (7)

Václav Kaláš

Technické faktory, ktoré umožnili grandiózny rozvoj svetovej robotiky

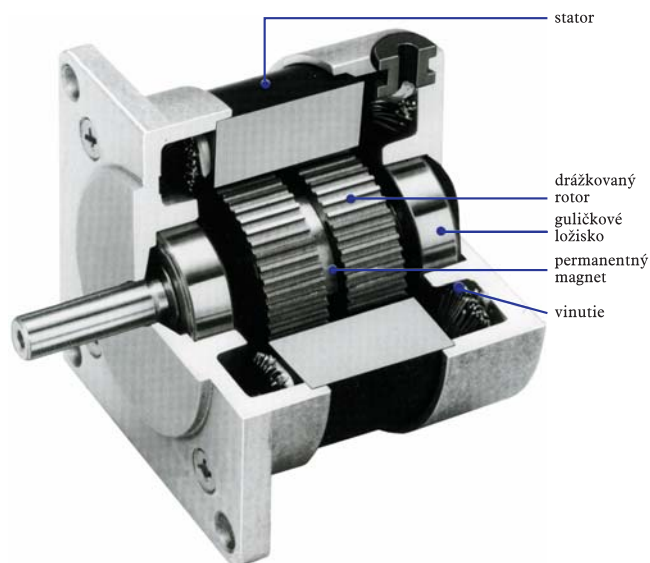
12.4 Servopohony robotov s krokovými motormi

Razantný rozvoj robotiky podnietil rozvoj pohybových systémov robotov aj s krokovými motormi. Ide opäť o motory, ktoré pracujú na reluktančnom princípe a možno ich zaradiť do skupiny diskretných pohonných jednotiek. Pritom rozvoj pohybových systémov s elektrickými krokovými motormi začal v 60-tych rokoch. Krokový motor reprezentuje elektromechanický menič počtu riadiacich impulzov na mechanické premiestnenie, pričom rýchlosť premiestňovania závisí od frekvencie týchto riadiacich impulzov. Podstatou činnosti krokového motora je to, že magnetický tok motora mení svoju polohu diskretné. Tento motor reprezentuje mnohparametrovú nelineárnu sústavu. Typický geometrický krok motora je spravidla v intervale 0,5 až 15°. Krokové motory sú 1-, 2-, 3-, 4-, 5- a 8-fázové. Maximálna frekvencia riadiacich impulzov môže dosahovať 15 kHz i viac.

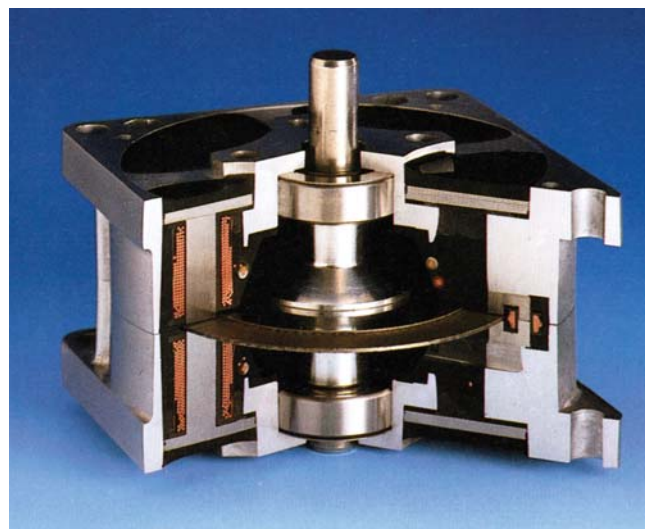
Medzi výhody týchto motorov možno zaradiť najmä tieto faktory: jednoduché napojenie motora na riadiaci systém, pomerne jednoduchý akčný člen, t. j. jednoduchý ovládač motora, automatická samosvornosť pohonného systému v statickom režime (ak sa nevyžaduje príliš veľký statický synchronizačný moment, nie je potrebná špeciálna brzda systému), možnosť, v menej náročných prípadoch, koncipovania rýchlostných i polohových servopohonov v otvorených štruktúrach, t. j. bez potreby snímačov a regulátorov uvedených regulačných veličín (ak neuvažujeme s prípadnou reguláciou prúdu) a možnosť dosiahnuť vysokú presnosť polohovania, najmä pri aplikácii tzv. elektronického drobenia kroku. Medzi hlavné nedostatky servopohonov s krokovými motormi patria najmä nasledujúce faktory: pomerne veľká hmotnosť

v relácii k výkonu, momenty približne do 20 Nm, v štandardných štruktúrach nízky synchronizačný moment pri vyššej rýchlosti, nízka zrýchliteľnosť, pomerne nízka imunita voči parazitným signálom, možné malé tlmenie pohonu, malý nadkritický moment zotrvačnosti, existencia rezonančných zón a pod. Postupne, hlavne v 80-tych rokoch, došlo k výraznému zdokonaleniu krokových servopohonov jednak doplnením rotora krokového motora axiálnym permanentným magnetom (obr. 37), čím výrazne stúpol synchronizačný moment motora v závislosti od frekvencie riadiacich impulzov. Zlepšili sa aj tlmiace vlastnosti motora, zvýšili sa maximálne otáčky motora a pod.

Mimoriadny význam malo zavedenie riadiacich systémov s elektronickým drobením kroku, čo umožnilo znížiť pôvodný geometrický krok motora aj o 2 rády a viac. Drobenie kroku ďalej umožnilo takmer úplné potlačenie rezonančných zón motora a pri aplikácii akčného člena s reguláciou prúdu vo vinutiach motora ako prúdového zdroja, predĺžila sa momentová synchronizačná charakteristika motora, zvýšila sa rýchlosť a stúpila účinnosť systému. Drobením kroku sa aj zvýšila rozlišovacia schopnosť systému a dosiahlo sa výrazné zrovnomenenie chodu motora najmä pri mikropolohovaní. Okrem toho, niektoré firmy začali produkovať krokové motory s diskovou kotvou, čo zlepšilo dynamické vlastnosti pohonných systémov (obr. 38). Naviac boli vyvinuté riadiace štruktúry krokových motorov s pevnými a s pružnými spätnými väzbami, ktoré spolu s vhodnými rozbehovými a brzdnými časovými priebehmi frekvencie riadiacich impulzov, príp. adaptívnym drobením a s vektorovým riadením kroku vytvorili vhodný segment servopohonov pre robotiku [33], [34], [35].

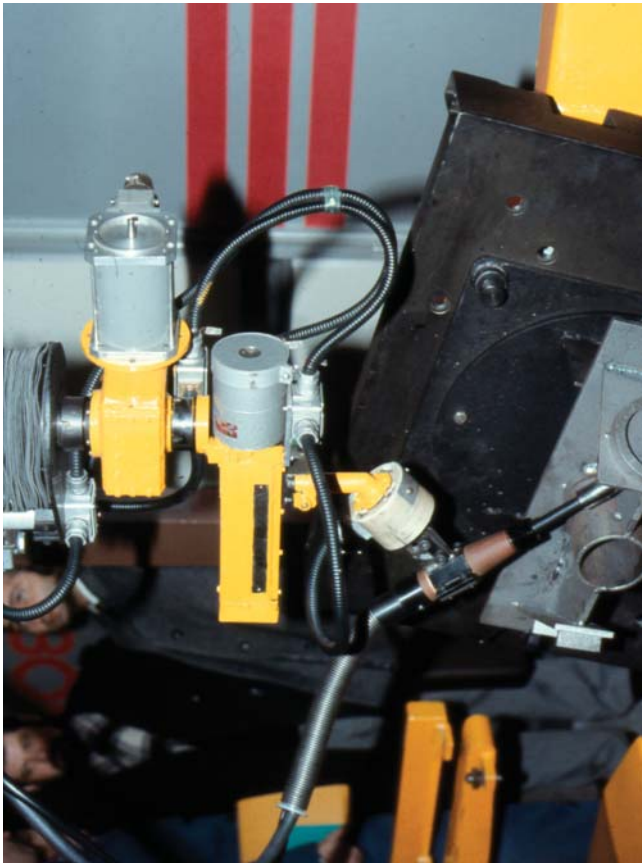


Obr.37 Krokový motor s axiálnym permanentným magnetom na rotore japonskej firmy SINANO ELECTRIC Ltd.



Obr.38 Diskový dvojfázový krokový motor švajčiarskej firmy ESCAP, ktorý má veľmi tenký rotor s permanentnými magnetmi

Na obr. 17 a 18 nášho seriálu boli prezentované roboty s československými krokovými servopohonmi, pričom robot ROTES 2-01 mal už aplikované všetky významné konštrukčné i riadiace funkcie uvedené vyššie. Na ilustráciu je na obr. 39 uvedený priemysel



Obr.39 Zvárací robot s krokovými motormi automatizovaného zváracieho pracoviska 7RL2 – ZŤS (r. 1986 – 87)

ný zvárací robot v komplexe 7RL2-ZŤS z druhej polovice 80-tych rokov osadený servopohonmi s krokovými motormi. Robot je súčasťou automatizovaného technologického zváracieho pracoviska, so siedmimi stupňami voľnosti pre zvarence s rozmermi 1000 x 1000 x 800 mm a s hmotnosťou do 250 kg. Nosnosť koncového bodu robota je 20 kg. Výsledná presnosť polohovania systému je $\pm 0,2$ mm. Riadiaci systém obnáša už uvedené funkcie. V ďalšom vývoji robotov možno očakávať progresívny nárast servopohonov s krokovými motormi, a to aj s ďalším rozvojom ich riadiacich štruktúr. S vysokou pravdepodobnosťou možno tiež tvrdiť, že sa v budúcnosti v robotike razantnejšie presadia aj mikrokrokové magnetostrikčné pohonné jednotky hlavne v super presných robotoch [46] a aj systémy s gigantickou magnetostrikciou. Prítom už dávnejšie rad mikroelektronických firiem ponúka pre súbory napr. 6-tich servopohonov uvažovanej kategórie riadiace systémy na jedinom čipe.

12.5 Servopohony robotov s lineárnymi motormi

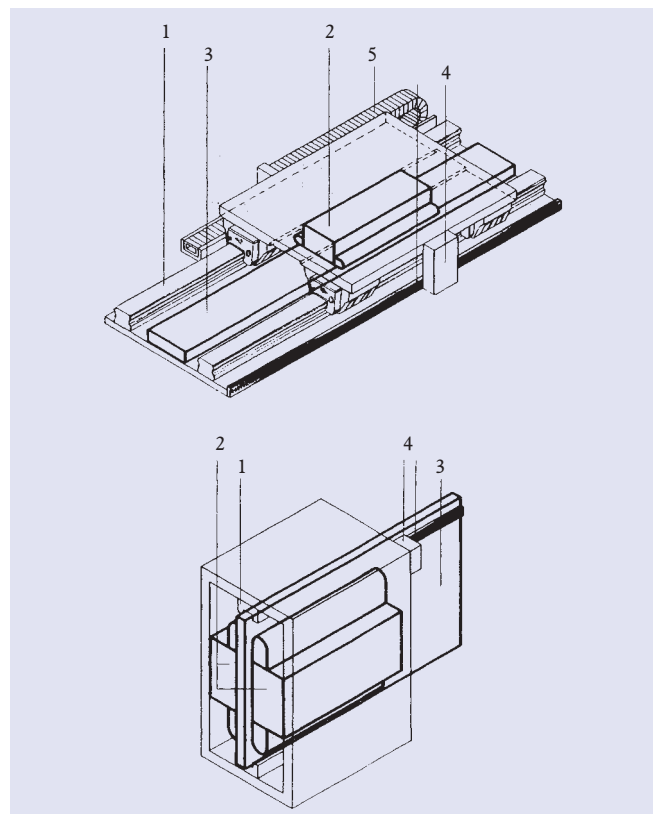
Aplikácie lineárnych, t. j. translačných pohybových systémov robotov prostredníctvom lineárnych motorov boli ešte donedávna dosť zriedkavé. So zdokonaľovaním ich konštrukcie a riadiacej elektroniky sa situácia začína výrazne meniť. Použitie lineárnych servopohonov v robotike môže výrazne zjednodušiť rad kinematických štruktúr robotov, a to najmä pri robotoch na pojazde, pri robotoch, ktoré pracujú v karteziánskom súradnicovom systéme a pod. Takýto konštrukčný prístup môže viesť aj k vypusteniu reduktorov, pri ktorých má najmä mechanická hysterézia negatívny vplyv na presnosť polohovania a takisto má silný destabilizačný účinok.

V súčasnosti je na svetovom trhu pomerne veľká ponuka lineárnych elektromotorov najmä na asynchrónnom, synchronnom a krokovom princípe. Fyzikálne ide o „rozvinutie“ rotačného motora do dĺžky. Prítom v posledných dvoch modifikáciách sú aplikované špičkové permanentné magnety, predovšetkým na pohyblivých častiach lineárnych motorov. Aplikáciou lineárnych

motorov sa ďalej znižuje trenie pohonného systému, znižuje sa opotrebovanie mechanických častí robotov a môžu sa zvýšiť dynamické vlastnosti servopohonov. Podobne možno lineárne motory využiť v systémovom okolí robotov, napr. v dopravných systémoch.

Z európskych výrobcov lineárnych motorov možno uviesť napr. firmy BAUMÜLLER, BAUTZ, KRAUS MAFFEI, BOSCH, SIEMENS a iné. Firma BAUTZ ponúka napr. asynchrónne lineárne motory s aktívnymi dĺžkami 520, 1040, 1456 mm so šírkou 110 a 150 mm, pričom ich možno mechanicky radiť za sebou. Lineárne motory vyvinuté vo Výskumnom ústave elektrických strojov (VÚES) Brno majú ťažnú silu od 500 do 4000 N. Používajú vodné chladenie primárnej časti. Z amerických výrobcov lineárnych motorov možno uviesť okrem iných firmu NORMAG s motormi s ťažnou silou do 2500 N, s rýchlosťou do 5 m/s a s presnosťou polohovania $\pm 0,0025$ mm. Firma INDRAMAT ponúka lineárne motory typu LAF so zrýchlením 200 m/s² s presnosťou polohovania $\pm 0,01$ mm na dĺžke 250 mm. Asynchrónne lineárne motory tejto firmy s ťažnou silou do 8000 N pracujú so zrýchlením do 100 m/s² [35], [36], [37], [38]. Okrem uvažovaných plochých lineárnych motorov sa používajú aj iné typy napr. tzv. rúrové lineárne motory. Rúrové lineárne motory spoločnosti LINEARDRIVES pracujú s ťažnou silou od 21 do 262 N s rýchlosťou do 4 m/s a so zrýchlením do 40 m/s².

Pri aplikácii lineárnych motorov v robotike môže byť primárna časť motora - vinutý induktor jednostranný, resp. obojstranný. Sekundárnu časť v asynchrónnom motore reprezentuje medený, resp. hliníkový pás pozdĺž dráhy robota, resp. opačne. Motory sú riadené frekvenčne, pričom polohovanie robota možno dosiahnuť s celkovou presnosťou na desiatiny mm i lepšou. Ako snímače polohy, sa uplatňujú napr. indukčné, magnetostrikčné, resp. inkrementálne snímače polohy s náhonom od presného meracieho ozubeného hrebeňa umiestneného pozdĺž dráhy dlhšej i niekoľko metrov. Na ilustráciu sú na obr. 40 uvedené lineárne jednostranné a obojstranné asynchrónne motory KRAUS MAFFEI, kde 1 je lineárne valivé vedenie systému, 2 – primárna pohybová časť mo-

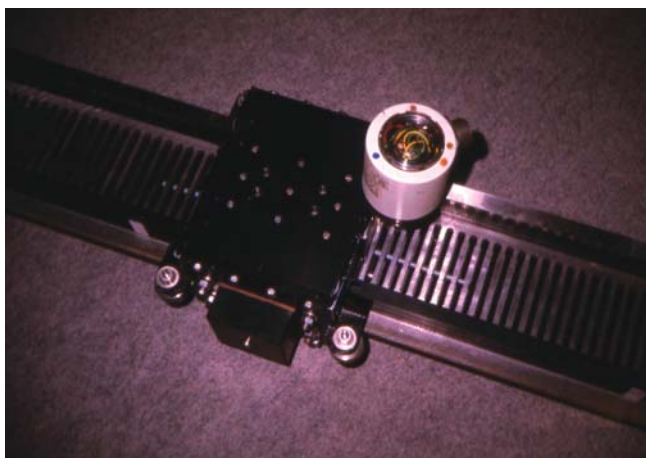


Obr.40 Lineárny asynchrónny motor firmy KRAUS MAFFEI s jednostrannou (hore) a dvojstrannou (dole) primárnou časťou



tora s vinutím, 3 – kotva motora v tvare elektricky vodivého pásu, 4 – snímač polohy, 5 – káblový žľab.

Pri aplikácii vektorového riadenia v týchto systémoch možno realizovať priebežnú automatickú identifikáciu časovo neinvariantných parametrov motora, získať aktuálny a relatívne presný matematický model motora a len na báze regulačného obvodu sily realizovať pomocou signálnych procesorov kvalitnú adaptívnu reguláciu rýchlosti bez špeciálnych snímačov tejto veličiny. Uvedené nadradené regulačné slučky, ale aj jadro kaskádovej štruktúry, t. j. generátor sily sú riešené len v riadiacom mikropočítači pri použití senzorových systémov prúdu a napätia. Tieto mnohorozmerné nelineárne a časovo premenlivé štruktúry vyžadujú spravidla riadenie metódami stavového priestoru s rekonštrukciou stavových premenných pomocou pozorovateľa. Do týchto pohybových systémov začínajú navyiac v poslednom období prenikať i štruktúry s neurónovým a fuzzy riadením, ktoré ďalej znižujú náročnosť na matematický model motora a zvyšujú odolnosť daných štruktúr [39], [40]. Na ilustráciu je na obr. 41 uvedený lineárny krokový motor manipulátora pre technologický proces výroby polovodičových prvkov vyvinutý vo VÚSE Běchovice a VÚMA Nové Mesto nad Váhom. Riadiaci systém s mikroprocesormi 8048 tejto pohonnej jednotky bol navrhnutý a zhotovený na Katedre automatizácie a regulácie (KAR) EF SVŠT v Bratislave v roku 1988. Na pohyblivej časti motora je okrem valivého uloženia permanentný magnet a inkrementálny snímač polohy. Parametre motora sú: aktívna dĺžka motora 700 mm, ťažná sila 200 N, mechanický krok 3,2 mm drobený 64 mikrokrokmi. Servopohon tohto systému pracoval s pružnou spätnou väzbou s vektorovým riadením.

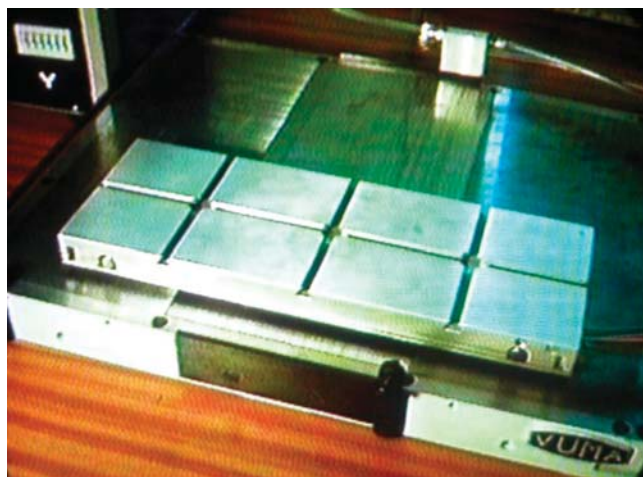


Obr.41 Lineárny krokový motor manipulátora s vektorovým riadením a s drobením kroku s ťažnou silou 200 N – VÚSE Běchovice, VÚMA Nové Mesto n./Váhom, KAR EF SVŠT Bratislava (r. 1986)

12.6 Netradičné servopohony robotov

Okrem už uvedených servopohonov robotov uvedieme ešte stručne niektoré ďalšie pohybové systémy.

Možno konštatovať, že perspektívne do servopohonov robotov citeľne zasiahnu motory s viacerými stupňami voľnosti, pričom teoreticky by mohlo ísť až o päť stupňov voľnosti v jednom systéme. Prakticky sa uvažuje so 4 stupňami voľnosti, napr. v aplikáciách, kde induktor motora reprezentuje guľovú sférickú plochu. Stator motora v tvare dutej gule má vinutie jednak v smere poludníkov a jednak v smere rovnobežiek. Drážky na vinutie sa pretínajú s uhlom 90°. Guľový dutý rotor je z feromagnetika, pričom na jeho povrchu je nanosená vrstva medi (kotva nakrátko) s vrstvou chrómu. V dutom guľovom rotore v radiálnom smere sa nachádza ešte ďalší rotačno-lineárny pohybový systém. Hoci tieto návrhy i realizácie (napr. francúzsky patent č. 7907382, resp. [41]) vznikli približne pred 25 rokmi, najmä z technologických a ekonomických



Obr.42 Plošný krokový motor s dvoma stupňami voľnosti X-Y s aerostatickým uložením pohyblivej časti, s nosnosťou 16 kg – VÚMA Nové Mesto, VÚSE Běchovice, KAR EF SVŠT Bratislava (r. 1989)

kých dôvodov sa dostávajú do vážnejšieho výskumného a vývojového predia až v súčasnosti.

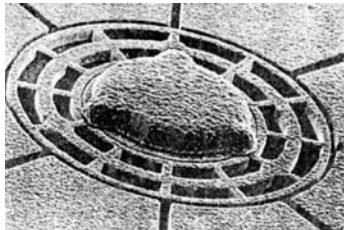
Na obr. 42 je uvedený plošný krokový motor s dvoma stupňami voľnosti X-Y produkcie VÚMA Nové Mesto nad Váhom, VÚSE Běchovice. Riadiaci systém bol navrhnutý a realizovaný na KAR EF SVŠT v Bratislave. Pohyblivá časť motora sa môže pohybovať po ľubovoľnej trajektórii v aktívnej rovine motora. Pohyblivá časť je s aerostatickým uložením, t. j. pláva na vzduchovom vankúši s tlakom 400 kPa. Vzduchová medzera je 25 μm . Zospodu pohyblivej časti sú dýzy tlakového vzduchu, vinutie X,Y a snímače polohy. Spodná rovinná časť motora mala krížové drážky na vytvoreniu zubov pre pohyby X-Y. Mechanický krok motora bol 512 μm s drobením kroku na 2 μm , nosnosť pohyblivej časti je 16 kg. Manipulačný systém s týmto motorom bol určený na mechanické laserované trimovanie, na optické technológie a použitia v medicíne.

Medzi netradičné pohybové systémy robotov možno zaradiť aj pohony na báze tvarovej pamäte so zliatinami SMA, ktoré sme opísali v kapitole (5) a pohybové systémy s umelými svalmi, ktoré budú v súvislosti s chápadlami robotov uvedené v kapitole (8). Za perspektívne možno v oblasti robotiky označiť aj využitie piezoelektrického efektu na konverziu elektrickej energie na mechanickú. Za veľké výhody možno pokladať to, že tieto motory nemajú žiadne feromagnetikum ani vinutie, že majú pomerne veľký špecifický výkon, uspokojivú účinnosť, široký regulačný rozsah, pomerne vysoký moment, resp. silu, dobré regulačné charakteristiky, ďalej to, že v motore nie sú magnetické polia ako zdroj rušenia, že môžu pracovať bez reduktorov, že sa dajú koncipovať aj ako systémy s lineárnym pohybom, že teplota prostredia môže byť do 250 °C a pod. Tieto motory sa ďalej vyznačujú dobrou technologickosťou z hľadiska automatizovanej výroby, vynikajúcimi dynamickými vlastnosťami, aperiodickým pohybom a nízkou cenou. Možno konštatovať, že tieto motory sa ešte viac presadia v oblasti mikropoložovania robotov i v oblasti translačných pohybov napriek tomu, že tieto systémy môžu vykazovať určité nelinearity a dosť nízku životnosť.

Firma AEG vyvinula koncom 80-tych rokov diskové piezoelektrické servomotory s krútiacim momentom do 200 Ncm, v ktorých sa vytvára mechanický pohyb s využitím postupnej rezonančnej vlny na rozhraní piezoelektrických materiálov statora a rotora [42]. Motor môže dosiahnuť 3000 ot./min., pričom jeho životnosť je približne 15 000 hod. Pri nulovej rýchlosti je motor v režime brzdy. Motor má enormne vysokú štihlosť, tichý chod, výborné dynamické vlastnosti a jednoduché riadenie. Výkony môžu byť v intervale hodnôt od 2 W do desiatok W. Účinnosť týchto

chto motorov je približne 40 %. Ďalšie informácie o piezoelektrických motoroch možno nájsť napr. v [43].

Pre superminiaturne roboty, najmä na medicínske účely, boli v laboratóriách HIROUKI FUJITA na Tokijskej univerzite v spolupráci s výskumom IBM a za pomoci MIT Massachusetts a Univerzity of California (San Diego) vyvinuté a mikroelektronickými technológiami vyrobené elektrostatické (kondenzátorové) mikromotorčeky na báze niklu, ktoré majú priemer 120 μm a hrúbku



Obr.43 Elektrostatický mikromotorček HIROUKI FUJITA – IBM – MIT s priemerom 120 μm pre medicínske mikroroboty

7 μm (obr. 43), ktoré môžu dosiahnuť až 10 000 ot./min. Pritom sa podobné mikromotorčeky v súčasnosti vyrábajú aj v ďalších inštitúciách aj na báze iných mikroelektronických materiálov, a to aj s mikrominiatúrnymi reduktormi [44].

Okrem toho, napr. švédsky Royal Institute of Technology vyvinul nohový mikrorobot, ktorý unesie 50-násobnú

záťaž svojej hmotnosti [45]. Okrem nových materiálov, nových mechanických a magnetických komponentov, nových pohybových systémov by bolo možné uviesť rad ďalších významných elementov, resp. uzlov robotov, ktoré zohrali vo vývoji robotiky mimoriadnu úlohu. Rozvoj robotiky by napr. bol nemysliteľný bez pokrokov v mikroelektronike a výkonovej elektronike, kde riadiace minipočítače robotov umožňujú realizovať, a to v mnohých prípadoch i v reálnom čase, neobyčajne zložité, identifikačné, rozhodovacie, optimalizačné, senzorické i riadiace funkcie. Podobne by bolo možné hodnotiť i problematiku programovania riadiacich systémov a aj problematiku senzorických systémov a iných významných oblastí v robotike.

Literatúra

[33] KALAŠ, V. a kol.: Nelineárne a číslicové servosystémy. Bratislava: Alfa, 1987.

[34] KALAŠ, V., DOLEŽAL, M., ZEMÁNEK, V.: Číslicové servosystémy s krokovými motormi s extrémnymi parametrami. In: AT&P journal, 1996, č. 5, s. 3 – 6.

[35] DOTTE, Y.: Servomotor and motion control using digital signal processors. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1990.

[36] Referát: Použitie lineárnych elektromotorov v praxi. In: AT&P journal 1/1996, s. 21.

[37] HOLUB, G.: Netradiční elektrické pohony pro obráběcí stroje. In: Elektrotechnika v praxi, 2000, č. 9 – 10, s. 34.

[38] GEORG, K., HUTH, G.: Permenentengerete Einbaumotoren Werkzeugmaschinen – Spindel. In: Antriebstechnik 1999, č. 11, s. 50 – 57.

[39] JOVANKOVIČ, J., ŽALMAN, M.: Sensorless servopohon s neuronovým pozorovateľom rýchlosti. In: AT&P journal 2001, č. 2, s. 75 – 77.

[40] GACHO, J., ŽALMAN, M.: Realizácia rýchlostného servosystému s asynchrónnym motorom s rozšíreným Kalmánovým filtrom. In: AT&P journal 2002, č. 2, s. 67 – 70.

[41] KLUG, L.: Nové smery a tendencie vo vývoji pohonných motorov robotov. In: Výkonová elektronika 1984, č. 7, s. 26 – 30.

[42] SCHADEBROTT, G., SALOMON, B.: Der Piezo-Wanderwellenmotor, Ein Neues Antriebsselement Aktorik. Elektrotechnik und Informationstechnik, 1990, No. 10, s. 495 – 498.

[43] NOGAREDE, B. a kol.: Electromechanical Modelling and Analog Torque Estimation of a Ring Shaped Travelling – Wave piezoelectric Motor. In: Electrical Engineering Research Report, Number 5, June 1998, s. 9 – 18.

[44] HUDEK, P. a kol.: Submikrometrové štruktúry. In: 50 rokov od objavu tranzistora, s. 32 – 39, STU SAV Bratislava, 1997.

[45] Materiály firmy Humusoft, s. r. o.: Femlab stál u zrodu pohonu pro mikrorobota. In: AT&P journal 2002, č. 3, s. 38 – 39.

[46] BENBOUZID, M. E. H.: Magnetostrictive direct microstepping rotary motor finite element modelling and performance analysis. In: Electrical Engineering Research Report, Number 4, January 1998, s. 3 – 6.

Pokračovanie v budúcom čísle.

prof. Ing. Václav Kalaš, DrSc.

**Slovenská technická univerzita
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
e-mail: vaclav.kalas@stuba.sk**

24