

NiTi drôt - senzor aj aktuátor

Peter Drahoš, Olga Čičáková, Peter Juračič

Pohon SMA (Shape Memory Alloy – zliatina s tvarovou pamäťou) sa správa ako silne nelineárna, hysterézna a mnohoparametrická dynamická sústava s premenlivým dopravným oneskorením, závislá od počiatočných podmienok a smeru pohybu. Proporcionálne ovládanie polohy pohonu SMA nie je možné len na základe matematických modelov s dostatočnou presnosťou. Používa sa riadenie so spätnou väzbou. Článok sa venuje možnosti využiť meranie elektrického odporu pohonu SMA a jeho teploty na účely rekonštrukcie polohy, pričom SMA má funkciu aktuátora a zároveň aj senzora. Je to alternatíva k snímačom polohy, ktoré sú mnohonásobne rozmernejšie a ťažšie než samotný pohon SMA. Vzhľadom na zložitosť podmienok a množstvo parametrov bolo kalibračné meranie automatizované číslivými meracími prístrojmi Agilent a Hewlett Packard s komunikáciou po zbernici GPIB.

Úvod

Zliatiny s tvarovou pamäťou (SMA – Shape Memory Alloys) premieňajú tepelnú energiu na mechanickú energiu zmenou štruktúry kryštalickej mriežky, tzv. termoelastickou martenzitickou transformáciou (Duerig 1990). Pohony skonštruované z týchto zliatin patria do skupiny tepelných pohonov (tepelný aktuátor). Tepelné aktuátory využívajú javy, ako je tepelná rozťažnosť tuhých materiálov (napríklad v termostatických bimetaloch) alebo ako sú objemové zmeny skupenských premien tuhá látka/kvapalina alebo kvapalina/plyn (napríklad v parafínových aktuátoroch – termostatických ventiloch na vykurovacích telesách). Zliatiny s tvarovou pamäťou majú pozoruhodnú schopnosť „zapamätať“ si predchádzajúci tvar po tom, ako boli zdeformované, a tento tvar dosiahnuť pri ohreve alebo pri ochladení (na základe zmeny teploty) a konať pri tom užitočnú mechanickú prácu. Fyzikálna podstata pamätového javu sa odlišuje od podstaty javov pri iných známych tepelných aktuátoroch. SMA využívajú „vnútorné molekulové sily“ a ponúkajú nové perspektívy v technikách pohonov s úplne novými vlastnosťami. Ide predovšetkým o rozmanitosť formy a tvaru SMA pohonov a veľmi dobrý pomer mechanický výkon – hmotnosť, nehlučnosť, bezúdržbovosť (netreba mazať) a navyše sú antikorozívne (NiTi). Tieto vlastnosti utvárajú nové možnosti pri konštrukcii „ľahkých“ pohonov bez prídavných mechanických prevodov, najmä v oblasti mikropohonov, pohonov robotov, chápadiel a v mechatonike. Materiály SMA majú atribúty senzorov aj aktorov a vedľa sa uviesť do „zapamätaného“ tvaru, z čoho pramení pomenovanie inteligentné alebo „smart“. Na ilustráciu atraktívnych vlastností SMA jeden príklad. V experimentoch používaná vzorka dokáže zodvihnúť opakovane 0,5 kg, čo je 10.000-násobok jej vlastnej hmotnosti. Jednorazovo zodvihne cca 3 až 5 kg.

Elektrický odpor pohonu SMA prináša agregovanú informáciu o predĺžení, zaťažení, teplote a miere fázovej transformácie. Meranie elektrického odporu a teploty pohonu SMA sa javí ako vhodná možnosť na rekonštrukciu informácie o polohe a vytvorenie spätnej väzby bez použitia snímača polohy, ktorý svojimi rozmermi a hmotnosťou vysoko prevažuje samotný pohon SMA. S týmto cieľom bolo vytvorené meracie pracovisko pre priamy drôt NiTi, ktorý je zaťažovaný konštantnou záťažou. Pracovisko umožňuje merať elektrický odpor a výkon, polohu a teplotu vzorky z NiTi pohonu. Merací experiment bol riadený s použitím meracích prístrojov s komunikáciou cez zbernicu GPIB. Pri posledných meraniach bola nezávislým regulačným obvodom riadená teplota pohonu SMA.

Teoretický fundament

Predmetom skúmania je pohon zo zliatiny s tvarovou pamäťou. Pohon SMA je realizovaný zo zliatiny NiTi (ekvatomárne zloženie (1,5 at. %) s tvarovou pamäťou pri transformačných teplotách nad

teplotou okolia 25 °C. Ide o priamy drôt s kruhovým prierezom, mechanicky uchytený a elektricky pripojený v rovnakom mieste. Pohon SMA je ohrievaný prostredníctvom elektrického odporového ohreву a chladený okolitým vzduchom prirodzenou konvekciou. Pohon SMA je zaťažovaný konštantnou vratnou záťažou. Záťaž pohonu je obmedzená tak, aby sa neprejavili procesy únavy materiálu.

Vo väčšine prác sa predpokladá určitý stupeň idealizácie modelu SMA. V ďalších častiach bude uvažovaný „uniaxiálny“ pohyb pohonu SMA, teda anizotropné vlastnosti materiálu sa neuplatnia.

Na pohon SMA, ktorý má tvar drôtu, sa z hľadiska jeho elektrického odporu môžeme pozeráť podobne ako na odporový kovový drôťkový tenzometer. Odpor drôťka R sa jeho deformáciou mení, pričom táto zmena súvisí so zmenami jeho rozmerov, dĺžky l a prierezu S , resp. so zmenou mernej rezistivity ρ .

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

Zásadný rozdiel SMA oproti používaným kovovým tenzometrom spočíva v mechanizme pôsobenia teploty a zmene kryštalickej mriežky (fázy), ktorá ju pri SMA sprevádza. Spoluautor článku (v prácach Drahoš 2001, Drahoš 2002) odvodil všeobecnú rovnicu pre elektrický odpor drôtu SMA:

$$\frac{dR}{R} = \pi_e d\sigma + K_\epsilon d\epsilon + \alpha_{RT} dT \quad (2)$$

Základné stavové veličiny sú teplota T , mechanické napätie σ , relatívne predĺženie ϵ a miera transformácie – frakcia martenzitu X . Vstupnými veličinami meranej sústavy sú: elektrický príkon P , teplota okolia T_0 , mechanická záťaž vo forme sily F_L , ktorá pôsobí v pozdĺžnej osi pohonu. Stavová veličina X (miera kryštalizácie martenzitu) funkčne závisí od teploty T a mechanického napätia σ a v rovnici ovplyvňuje koeficienty π_e a α_{RT} . Z teórie tenzometrov je známy piezorezistívny súčiniteľ $\pi_e = \delta\rho/\delta\sigma/\rho$ [MPa⁻¹] charakterizujúci vplyv kryštalografickej orientácie hmoty tenzometra na jeho mernú relatívnu rezistivitu. U kovových tenzometrov je koeficient π_e konštantný, kým pri materiáloch SMA je funkciou frakcie martenzitu (kryštalizácie) X . Ďalej koeficient $\alpha_{RT} = \delta\rho/\delta T/\rho$ [°C⁻¹] vyjadruje priamy vplyv teploty na mernú relatívnu odpor SMA. Pre materiály SMA je α_{RT} funkciou frakcie martenzitu X a nelineárnou, hysteréznou funkciou teploty T .

Koeficient tvarovej citlivosti K_ϵ má pre NiTi známu hodnotu: $K_\epsilon = 1,66$ ($K_\epsilon = 1 + 2\mu$, pre NiTi zliatinu je Poissonovo číslo $\mu = 0,33$). Koeficienty π_e a α_{RT} ako funkcie T , σ a X je potrebné stanoviť meraním. Treba si uvedomiť, že praktický – reálny pohon SMA nemá jedinú teplotu T , ale teplotné pole. Elektrický odpor, relatívne predĺženie a mechanické zaťaženie vieme merať jednoznačne.

V prípade konštantnej záťaže je $d\sigma = 0$ a rovnica (2) sa zjednoduší. Zataženie bude uvažované len ako konštantný parameter v niekoľkých diskretných hodnotách.

Ciele, podmienky a metódy experimentu

Experiment nemá za cieľ merať fyzikálne materiálové konštanty SMA. Časť z nich je možné získať od výrobcu SMA. Experiment sa orientuje na meranie statických charakteristík reálneho pohonu SMA, opísaného vyššie. Predpokladá sa, že merané veličiny a niektoré snímače budú prevádzkovými veličinami a snímačmi, určenými pre spätné väzby. V tom zmysle ide o kalibračné meranie pre rekonštrukciu polohy. Ďalším cieľom experimentu je mapovať správanie pohonu pri cyklických a nepravidelných pohyboch vo vnútri hysteréznej slučky.

Meranými veličinami sú: budiaci prúd SMA, napätie SMA, teplota SMA (termočlánok K) a poloha SMA (snímač LVDT – ZPA), teplota okolia (Pt 100). Drôt NiTi (rozmery: dĺžka 100 mm, priemer 0,32 mm, hmotnosť 52 mg) bol elektricky pripojený štvorvodičovo. Vyhodnocoval sa elektrický odpor (okolo 1 Ω) a elektrický príkon (do 1 W), dodávaný pohonu SMA.

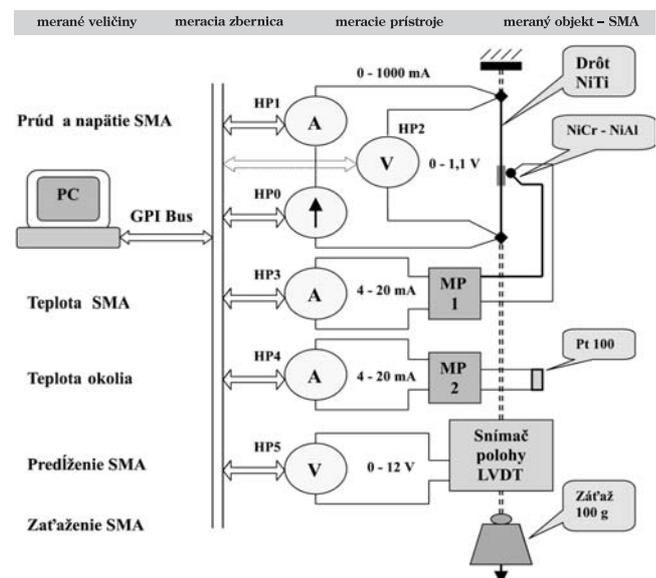
Pre zaručenie opakovateľnosti je treba pred a počas experimentu zabezpečiť nasledovné podmienky merania:

1. Konštantné podmienky chladenia SMA (prúdenie vzduchu, teplota okolia).
2. „Vymazanie pamäti pohonu“ pred meraním pomocou tepelného cyklovania bez záťaže.
3. Po zavedení záťaže merať v definovanom cykle (v prvom) za rovnakých počiatočných podmienok (SMA má pamäť predchádzajúcich stavov).
4. Záťaž je počas merania konštantná (presné závažie) a predstavuje parametrický vplyv.

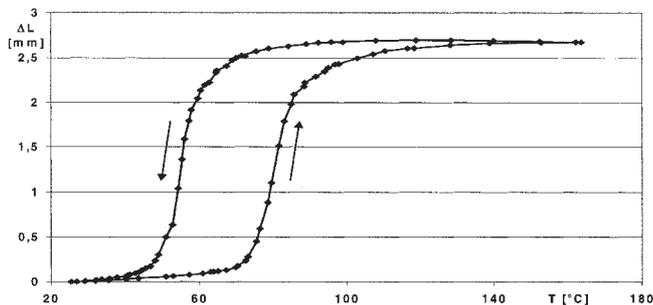
Výsledky experimentov

Vzájomné statické závislosti veličín, ako je teplota T , poloha L a odpor R pohonu SMA, sú na obr. 2, 3 a 4. Boli namerané súčasne pri konštantnom zatažení 100 g.

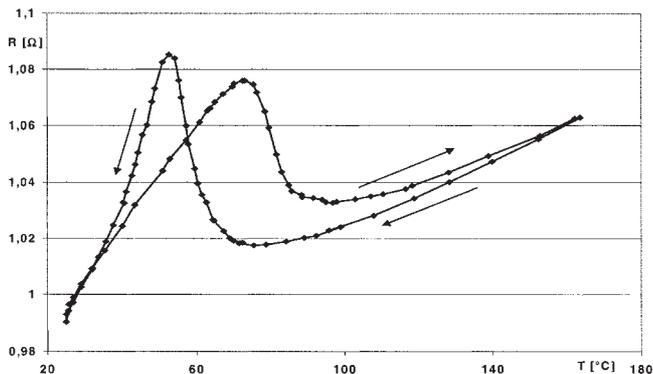
Hysterézna slučka z obr. 2, typická pre SMA, sa pri vyšších aplikovaných zatažení posúva k vyšším hodnotám teplôt. Parametricky závisí od zataženia (mechanické napätie σ).



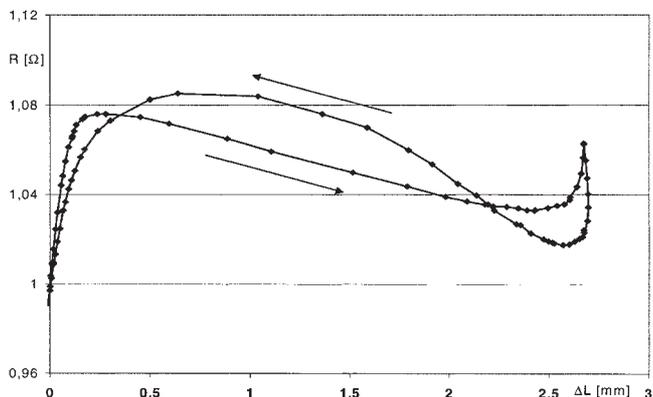
HP 0: riadený prúdový zdroj; Agilent E 3640 A alebo napätím riadený zdroj prúdu s obvodom Burr Brown (vlastnej konštrukcie)
 HP 1 až HP 5: multimetre HP 34401 A, Hewlett Packard
 MP 1: inteligentný merací prevodník teploty, Sitrans T, Siemens
 MP 2: inteligentný merací prevodník teploty, TT 301, Smar
 LVDT: lineárny bezdotykový transformátorový snímač polohy, 0 – 6 mm, ZPA
Obr.1 Schéma automatizovaného merania SMA



Obr.2 Závislosť elektrického predĺženia od teploty meranej termočlánkom pri zatažení 100 g



Obr.3 Závislosť elektrického odporu od teploty meranej termočlánkom pri zatažení 100 g



Obr.4 Závislosť elektrického odporu od polohy pri zatažení 100 g

Závislosť odporu od teploty na obr. 3 je tiež hysterézna, navyše s prekrížením kriviek nameraných nahor a nadol. Elektrický odpor SMA v sledovanej oblasti teplôt a zatažení sa mení len asi o 8 %, čo pri nominálnej hodnote 1 Ω predstavuje 80 m Ω . V týchto zmenách sú ukryté informácie o pohone SMA v zmysle rovnice (2).

Na obr. 4 je opäť výrazne nelineárna charakteristika. Všetky uvedené grafy predstavujú len vonkajšiu hysteréznú slučku, ktorá vzniká pri úplnom prechode z martenzitu do austenitu (nízkoteplotná a vysokoteplotná fáza zliatiny). Pre úplnosť je potrebné zaoberať sa vnútornými hysteréznymi slučkami, ktoré sú sprevádzané pamäťou predošlých stavov a ich opis presahuje rámec tohoto článku.

Na prvý pohľad by bolo možné získať informáciu o polohe len z meranej teploty obr. 2 alebo len z meraného odporu podľa obr. 4 s využitím vhodných aproximácií nameraných kriviek. V skutočnosti nie je možné takto jednoducho získať dostatočne presnú informáciu o polohe, a to vzhľadom na celý rad poruchových vplyvov. Medzi hlavné poruchy počas prevádzky pohonu patrí kolísanie teploty okolia a zmeny prúdenia chladiaceho vzduchu, zmeny zataženia, pamäť predošlých stavov pohonu SMA a závislosť od počiatočných podmienok a smere transformácie. Výskum pohonu SMA sa zameriava na súčasné meranie teploty a odporu, ktoré môžu informáciu o polohe stanoviť presnejšie.

Uvedené grafy predstavujú len zlomok nameraných dát, ktoré boli realizované pri parametrickej zmene zaťaženia, vo vnútri hysterézných slučiek a použitím rôznych postupov – metód pri meraní.

Technické prostriedky pre automatizované meranie

Meranie bolo realizované pomocou programovateľných číslicových meracích prístrojov: piatich multimetrov firmy Hewlett Packard 34401 A a jednosmerného zdroja Agilent E 3640 A. Pri všetkých multimetoch sme použili rozlíšenie na $6 \frac{1}{2}$ miesta. Tieto multimetre umožňujú merať jednosmerné aj striedavé priebehy elektrického napätia a prúdov, elektrický odpor dvojvodičovú, ako aj štvorvodičovú metódou, a tiež frekvenciu a periódu. Na komunikáciu s riadiacim počítačom majú vstavané rozhrania GPIB a RS 232. Multimeter na meranie elektrického prúdu, napätia a odporu umožňuje vzorkovanie 1000, 300, 50, 5 alebo 0,5 S/s. Pri vysokej frekvencii vzorkovania je skrátená doba prevodu meranej hodnoty na integračnom prevodníku, a tým sa aj znižuje počet zobrazených miest výsledku na displeji multimetra. Pri priamom posielaní výsledku na zbernicu GPIB frekvencia vzorkovania môže byť až 1000 S/s. Interná pamäť multimetrov na ukladanie údajov má veľkosť 512 meraných vzoriek. Jednosmerný, napätovo-prúdový zdroj Agilent E 3640 A má dva rozsahy do výkonu 30 W, s rozhraním GPIB a RS 232.

Zbernica GPIB (General Purpose Interface Bus) bola navrhnutá spoločnosťou Hewlett Packard s cieľom unifikovať spojenia rôznych meracích prístrojov so zámerom ich ovládania a zberu dát a je tiež známa pod skratkami HPIB a IEEE-488. Ide o celosvetovo rozšírený štandard na vytváranie automatizovaných meracích a testovacích systémov. Pospájanie jednotlivých zariadení je možné ako sériové alebo hviezdicové, ale aj ako kombinácia oboch typov prepojenia. Maximálna spoločná dĺžka prepájacích káblov môže byť 20 metrov a maximálny počet zariadení je 14. Tieto parametre sú postačujúce pre laboratórne účely, pre ktoré bola zbernica pôvodne navrhnutá. Príkazy a namerané údaje sa po dátovej zbernici predávajú ako 7-bitové znaky ASCII, pričom ôsmy bit slúži na zabezpečenie parity.

V riadiacej jednotke, ktorou bolo kompatibilné PC IBM, bola nainštalovaná karta GPIB ISA od firmy National Instruments a programové vybavenie na jej ovládanie. Aplikačné riadiace programy boli naprogramované jazyku C, v prostredí LabWindows alebo Borland.

Počítačové spracovanie umožňuje jednoduché a rýchle vypočítanie chyby údajov, ako aj neistoty. Relatívna chyba nameraných údajov pre prúd prechádzajúci cez SMA bola menšia ako 0,15 %, pre napätie na SMA bola menšia ako 0,008 %. Relatívna chyba napätia na prevodníku polohy bola menšia ako 0,005 %.

Záver

Spojité riadenie polohy aktuátora SMA pre mimolaboratórne použitie doposiaľ nie je úplne zvládnuté a bez spätných väzieb nie je možné s dostatočnou presnosťou. Vzniká tu priestor na využitie merania stavu SMA, z ktorého by bolo možné rekonštruovať želané veličiny (polohu, silu).

Elektrický odpor SMA v sebe nesie informáciu o teplote, polohe a zaťaženi. Uvedené automatizované merania prispievajú k výskumu rekonštrukcie polohy pri paralelnom prevádzkovom meraní teploty a odporu a súčasnom elektrickom odporovom ohreve drôtu NiTi vo funkcii pohonu.

Automatizované experimentálne pracovisko umožňuje na vzorkách z NiTi s dĺžkou 100 mm a hrúbkou 0,32 mm (hmotnosť 52 miligramov) merať polohu, teplotu a elektrický odpor a výkon. Tieto veličiny boli experimentálne merané modernými presnými multimetrami, ktoré umožňujú meranie automatizovať. Bez automatizá-

cie merania je experiment prakticky ťažko realizovateľný a bez šancí na vysokú presnosť výsledkov. Automatizácia merania priniesla vysokú výkonnosť merania (úsporu času), sofistikované ovládanie nezávislých vstupných veličín, vyhodnotenie presnosti, zabezpečenie opakovateľnosti, odstránenie subjektívnych chýb a digitálnu dokumentáciu meraní.

Výskum pohonov SMA bol realizovaný v rámci grantových výskumných projektov Katedry automatizácie a regulácie FEI STU Bratislava: VEGA 7628/20 a automatizované merania realizované v spolupráci s Katedrou merania FEI STU Bratislava.

Súčasný stav v oblasti SMA je možné charakterizovať neutíchajúcim hľadaním v teoretickej aj experimentálnej oblasti. Fyzikálny opis podstaty pamäťového efektu nie je ukončený. To však nebráni vývoju nových aplikácií, ktoré pri návrhu využívajú vhodné aproximácie a experimentálne databázy, zhromažďované najmä výrobcom komponentov SMA.

Literatúra

- [1] DUERIG, T. W. et al. (1990): Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. London: Butterworth-Heinemann, Ltd., 1990, pp. 491.
- [2] DRAHOŠ, P. (1995): Vlastnosti a použitie materiálov s tvarovou pamäťou. AT&P journal, 1995, 2, pp.12 – 15.
- [3] BIWA, S. et al. (1996): Analysis of Bias-Type Actuator Using Shape Memory Alloy Based on its Thermomechanical Constitutive Description. JSME Journal, 1996, 39, no. 4, pp. 526 – 532.
- [4] DRAHOŠ, P. (1997): Model of Shape Memory Alloy Drive. In: TRANSCOM 97. Proceedings of 2nd Conference, University of Žilina: 1997, Vol. 3, pp. 265 – 268.
- [5] DRAHOŠ, P. (2000): Thermodynamic Model of SMA Drive. In: Process Control 2000. [CD-Rom]. Proceedings of 4th Conference in ČR. University of Pardubice: 2000, pp. 71.
- [6] DRAHOŠ, P. (2001): Meranie elektrického odporu SMA servoaktuátora. In: Process Control '01. [CD-Rom]. SR Štrbské Pleso: 2001.
- [7] DRAHOŠ, P. (2002): Príspevok k syntéze aktuátora zo zliatiny s tvarovou pamäťou. FEI STU Bratislava 2002. Práca k dizertačnej skúške.
- [8] SMIEŠKO, V. (1994): Automatizované meracie systémy. Bratislava 1994.
- [9] HP 34401A Multimeter User's Guide. Hewlett Packard, 1996. USA, February 1996.
- [10] Function Reference Manual Win32. USA, 1998. National Instruments, 1998. NI-488. 2M™

Peter Drahoš
Oľga Čičáková
Peter Juračič

Katedra automatizácie a regulácie
a Katedra merania
FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
e-mail: drahos@elf.stuba.sk
olga.cicakova@elf.stuba.sk
juracic@decef.elf.stuba.sk

53