

Meracie členy mechanických veličín, odporová tenzometria a kalibrácia (1)

Ján Šturcel

Početná skupina meracích členov mechanických procesných veličín (tlak, sila, krútiaci a ohybový moment) využíva pri svojej činnosti odporovú tenzometriu. Zmena vodivosti kovov pri ich deformácii bola objavená Kelvinom už v roku 1856 a používanie napnutého odporového vodiča na meranie tlaku sa datuje od roku 1928. Odvtedy meracie systémy využívajúce deformáciu kovového alebo polovodičového odporového prvku prešli dlhým vývojom a zaznamenali veľké rozšírenie. V súčasnej dobe predstavuje odporová tenzometria samostatný odbor, ktorého jedna časť je zameraná na využitie v meracích členoch mechanických veličín.

1. Odporová tenzometria

Tenzometrické odporové snímače sa používajú buď pri experimentálnej analýze mechanického napätia strojov a štruktúr strojných zariadení, alebo ako súčasť meracích členov tlaku, sily, krútiaceho momentu, rýchlosti, zrýchlenia, prietoku a MČ parametrov mechanického kmitavého pohybu. Využívajú sa pri tom fyzikálne princípy umožňujúce snímanie mechanických veličín (napr. deformáciu, mechanické napätie, priehyb) v spojení s prevodom na elektrickú veličinu, takže ide o nepriame meranie mechanických veličín. Vďaka pomerne dlhému vývoju a hromadnej výrobe, tenzometre dnes vyhovujú väčšine aplikácií z hľadiska ceny i poskytovanej kvality. Tento stav sa dosiahol hlavne prostredníctvom vhodných konštrukčných riešení samotného snímača, použitými materiálmi a integrovanými meracími prevodníkmi (verzia smart).

Odporový tenzometer – predstavuje snímač, ktorého zmena elektrického odporu je závislá od zmien spôsobených jeho deformáciou. To znamená, že zmena odporu je určená zmenami geometrických rozmerov a zmenami kryštalografickej orientácie vlastného tenzometra. Vo veľkej väčšine prípadov súčasne s deformáciou pôsobí aj hlavná poruchová veličina – teplota okolia, ktorá vytvára nežiaducu zmenu teploty meracieho prvku a jeho podložky, a tým aj zmenu jeho odporu.

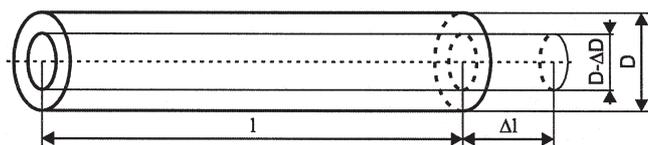
Pod pojmom deformácia (obr. 1) sa rozumie len deformácia spôsobená ťahom alebo tlakom v hraniciach Hookovho zákona (v rámci vratného deja) vzhľadom na malé rozmery snímača. Tento zákon opisuje lineárnu oblasť závislosti mechanického napätia (od relatívneho predĺženia alebo skrátenia ε), t. j.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

kde E je modul pružnosti a určuje vzťah medzi σ a ε , pričom pre pomerné predĺženie platí $\varepsilon = \Delta l / l$.

Elektrický odpor (Ohmov zákon) homogénneho vodiča dĺžky l s plošným prierezom S a špecifickým odporom ρ je daný vzťahom

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



Obr.1 Mechanické deformácie ťahom namáhaného vodiča (predĺženie a zúženie)

Totálny diferenciál dR za predpokladu spojitych diferencovateľných funkcií má tvar

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial S} dS \quad (2)$$

a po úpravách pre konečné relatívne zmeny odporu $\Delta R/R$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{\Delta S}{S} \quad (3)$$

Pri mechanickom namáhaní vodiča ťahovou silou (obr. 1) dochádza ku geometrickým deformáciám a k mikroštruktúrnym zmenám materiálu (vplyv na ρ). Pri použití odporových tenzometrov je potrebné zabezpečiť, aby nenastala nevratná deformácia (za hranicu pružnosti podľa Hookovho zákona) a aby nevznikli nereverzibilné mikroštruktúrne zmeny. Obidve totiž vedú k znehodnoteniu snímača.

Podľa teórie pružnosti platí približne (pri zanedbaní vyšších členov rozvoja)

$$\frac{\Delta S}{S} \cong -2\mu \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

kde μ je Poissonovo číslo (od 0 do 0,5).

Potom po dosadení výrazu 4 do rov. 3 vychádza

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon(1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (5)$$

pričom posledný člen rov. 5 možno považovať (pri materiáloch vhodných pre tenzometre) úmerný pomernému predĺženiu, čiže $\Delta \rho / \rho \cong \tau \cdot \varepsilon$, z čoho plynie

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \tau) \cdot \varepsilon = K \cdot \varepsilon = (K_1 + K_2) \cdot \varepsilon \quad (6)$$

kde τ je piezorezistívny súčiniteľ.

Konštanta $K = (1 + 2\mu + \tau)$ reprezentuje súčiniteľ deformačnej citlivosti, ktorý vyjadruje závislosť relatívnej zmeny odporu od relatívnej deformácie a predstavuje všeobecný parameter tenzometrov, vhodný na ich katalógové usporiadanie. Výraz $K_1 = (1 + 2\mu)$ vyplýva zo zmien geometrických rozmerov tenzometra a prevláda pri kovových odporových tenzometroch. Hodnota τ závisí od mikroštruktúrných zmien materiálu (tzv. piezorezistencie) a je dominantná pri polovodičových tenzometroch (K_2). Pre kovové zliatiny dosahuje súčiniteľ K hodnotu od 2 do 4 a pre čisté kovy od -12 (Ni) do +6 (Pt). Pre polovodičové materiály to býva hodnota až 10-násobne vyššia. Rovnica 6 je splnená v obmedzenom rozsahu deformácií a je závislá od materiálu tenzometra. Ak platí, že $\varepsilon \leq 3 \cdot 10^{-3}$, potom je možné považovať prevodovú charakteristiku kovového tenzometra za lineárnu.

Vo všeobecnosti je vhodnejšie vyjadriť závislosť relatívnej zmeny odporu od relatívnej zmeny deformácie polynómom

$$\frac{\Delta R}{R_{0,0}} = C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 + C_3 \varepsilon^3 + \dots \quad (7)$$

kde $R_{0,0}$ je hodnota odporu snímača pri nulovej deformácii a počiatočnej teplote (obyčajne $\vartheta_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), pričom $C_1, C_2, C_3 \dots$ sú konštanty.

Meranú (vstupnú) veličinu reprezentuje relatívna deformácia tenzometra ε , výstupnú veličinu zasa relatívna zmena jeho odporu $\Delta R/R$, a tak prevodová charakteristika tenzometra je určená vzťahom

$$K_{\varepsilon,0} = \frac{d\left(\frac{\Delta R}{R_{0,0}}\right)}{d\varepsilon} = C_1 + 2C_2\varepsilon + 3C_3\varepsilon^2 + \dots \approx C_1 + 2C_2\varepsilon \quad (8)$$

Veličina $K_{\varepsilon,0}$ je tzv. tenzometrická konštantka, ktorá je daná predovšetkým vlastnosťami materiálu a predstavuje všeobecnejšie definovaný súčiniteľ deformačnej citlivosti tenzometra.

Teplotná závislosť tenzometrickej konštanty $K_{\varepsilon,0}$ je vyjadrená teplotným súčiniteľom α_K

$$\alpha_K = \frac{\Delta K / K_{0,0}}{\Delta \vartheta}$$

ktorý dosahuje pri tenzometroch (vhodných pre činnosť aj pri vysokých teplotách do $800 \text{ }^\circ\text{C}$, napr. nichróme V) hodnotu okolo $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Teplotný súčiniteľ odporu charakterizuje závislosť odporu tenzometra od teploty

$$\alpha_R = \frac{\Delta R / R_{0,0}}{\Delta \vartheta}$$

a jeho hodnota dosahuje pri najčastejšie používaných konštantných tenzometroch 10^{-5} K^{-1} . Prostredníctvom vhodnej kombinácie prísad a tepelného spracovania materiálu možno dosiahnuť záporné aj kladné hodnoty tohto súčiniteľa.

Okrem priameho vplyvu teploty na odpor tenzometrického snímača, vytvára sa pripojením privodných vodičov k tenzometru možnosť vzniku rušivých termoelektrických napätí (vznik termoelektrických parazitných článkov). Často je ovplyvnená tenzometrická konštantka $K_{\varepsilon,0}$ rozdielnosťou teplotného súčiniteľa dĺžkovej rozťažnosti meraného objektu α_m a telieska snímača α_s . Tak vzniká systematická chyba merania mechanického napätia. Zdanlivá deformácia vyvolaná teplotnými vplyvmi je daná

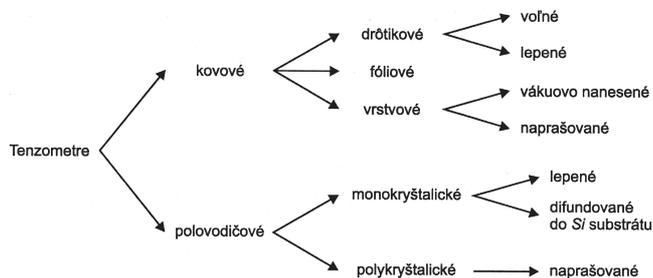
$$\varepsilon_{\vartheta} = \left(\alpha_m - \alpha_s + \frac{\alpha_R}{K} \right) \Delta \vartheta \quad (9)$$

Samokompenzujúce tenzometre sú vytvorené vhodnou voľbou materiálov, t. j. teplotných súčiniteľov α_m , α_s a α_R tak, aby potlačali systematickú chybu vyvolanú deformáciou ε_{ϑ} . Musia však byť aplikované iba na objekty s daným súčiniteľom α_m .

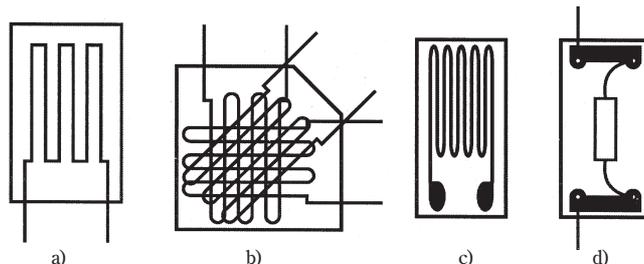
2. Rozdelenie tenzometrov podľa používaných materiálov

Podľa materiálu, konštrukčného tvaru a spôsobu upevnenia na meraný objekt možno odporové tenzometre rozdeliť podľa schémy na obr. 2.

Kovové tenzometre sa vyrábajú najmä zo zliatin Cu-Ni (konštantán), Ni-Cr (nichróm), Ni-Cr-Fe-Al (karma). Drôťkové snímače sú obyčajne vytvorené z vodičov s priemerom (10 až 40) μm . Najpoužívanejšie kovové tenzometre v súčasnosti sú lepené fóliové. Vyrábajú sa odleptaním fólie hrúbky (1 až 10) μm naparenej na podložke (od 5 μm). Možno ich zafažovať značnými prúdovými hustotami a po nalepení dobre kopírujú sledovanú deformáciu (do $\pm 0,15 \%$). Ich životnosť je približne 10^7 cyklov. Naprašované ko-



Obr.2



Obr.3 Odporové tenzometre

a) drôťkový tenzometer, b) drôťková tenzometrická ružica, c) fóliový tenzometer, d) polovodičový tenzometer

ové vrstvé tenzometre sa používajú takmer výlučne v snímačoch tlaku. Majú podobné vlastnosti ako fóliové typy, dosahujú však lepšiu časovú a teplotnú stabilitu.

Súčiniteľ deformačnej citlivosti sa pri kovoch mení v závislosti od typu materiálu – v rozsahu od 6,5 pre zliatinu Pt-Ir až po -10 pre Ni. Pri aplikácii kovových tenzometrov je vhodné použiť materiály vykazujúce minimálne mikroštrukturálne zmeny spolu s minimálnym teplotným súčiniteľom odporu. Pri výbere sa uprednostňujú kovové materiály, ktoré majú závislosť relatívnej zmeny odporu od meranej deformácie približne lineárnu (nelinearity sa prejavujú až pri väčších deformáciách).

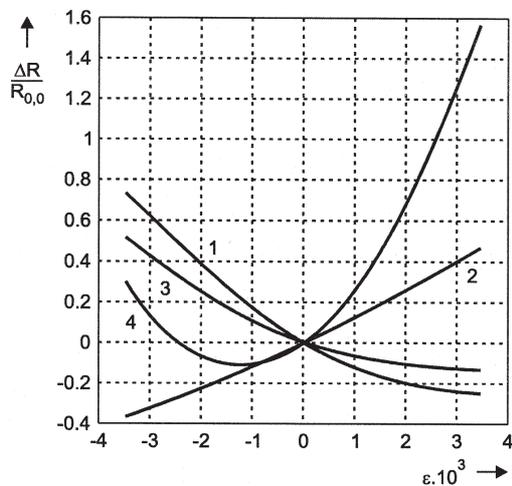
Polovodičové odporové tenzometre – vyznačujú sa teplotnou závislou a nelineárnou prevodovou charakteristikou. Vyrábajú sa z kremíka, ktorý má z hľadiska odporovej tenzometrie optimálny súhrn meracích a mechanických vlastností pre široký rozsah teplôt (relatívne malá chyba linearity, zanedbateľná mechanická a kryštalografická hysterezia, použiteľnosť pre väčší rozsah teplôt), pričom je aj ľahko dostupný. Konštanty C_1 a C_2 vo všeobecnej rovnici 7 sú závislé od typu vodivosti a dosahujú kladné hodnoty pri polovodiči z kremíka typu P a záporné pre typ N. Najrozšírenejšie monokryštalické tenzometre vytvorené difúznou technológiou sú na substráte Si tvoriacom súčasne pružný člen, napr. snímača tlaku. Chybu linearity možno znižovať zväčšovaním vodivosti, súčasne však klesá citlivosť snímača. Pri tomto type tenzometra vyvolaná zmena odporu je spôsobená predovšetkým mikroštrukturálnymi zmenami.

názov materiálu	približné zloženie [%]	priemerná hodnota K
konštantán	57 Cu, 43 Ni	2,05
karma	73 Ni, 20 Cr, resp. Fe + Al	2,1
nichróm V	80 Ni, 20 Cr	2,2
platína, wolfrám	92 Pt, 8 W	4

Tab.1 Najpoužívanejšie zliatiny pri výrobe odporových tenzometrov

vlastnosť	P-typ Si	drôťk Karma	pomer
súčiniteľ K	125	2	62,5
α_R (K^{-1})	$12 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	60
α_K (K^{-1})	$16 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	3,2
α_s (K^{-1})	600	40	15

Tab.2 Porovnanie vlastností polovodičových a kovových materiálov pre tenzometre



- 1 – typ P s $\rho > 10^3 \Omega\text{m}$ 3 – typ N s $\rho > 10^3 \Omega\text{m}$
 2 – typ P s $\rho = 2 \cdot 10^4 \Omega\text{m}$ 4 – typ N s $\rho = 3,1 \cdot 10^4 \Omega\text{m}$

Obr.4 Závislosť relatívnej zmeny odporu od relatívnej deformácie pre kremík

V praxi pri deformáciách pod 0,1 % a dovolenej chybe do 5 % sa nelineárny člen C_2 zanedbáva. Súčiniteľ deformačnej citlivosti dosahuje pri polovodičových tenzometroch hodnoty 50 až 175. V porovnaní s kovovými tenzometrami sú polovodičové omnoho citlivejšie, ich nevýhodou je však veľká chyba linearitý a veľká teplotná závislosť, takže obidve vyžadujú pri prísnejšej požiadavke na presnosť merania špeciálne vyhodnocovacie obvody.

Kovové i polovodičové tenzometre sa vyrábajú v typických odporových skupinách pre nezatažený stav (približne) 120, 350 a 1000 Ω . Vyššie hodnoty odporov umožňujú potlačiť vplyv prívodných vedení, avšak za cenu zväčšenia rozmerov snímača. V tomto prípade sa sníma priemerná hodnota deformácie materiálu pokrytého snímačom a zhoršujú sa aj dynamické vlastnosti meracieho prvku. Dôležitá je tiež tzv. smerová citlivosť tenzometra, ktorá je definovaná ako pomer citlivosti pri deformácii v smere hlavnej osi (rovnobežne s dlhšími úsekmi odporového materiálu tenzometra) a osi kolmej na hlavnú os.

Literatúra

- [1] ŠTURCEL, J.: Snímače a prevodníky. Bratislava, STU 2002. ISBN 80-227-1712-6
- [2] ŠTURCEL, J.: Meranie tlaku a tlakovej diferencie. AT&P journal, 6, 1999, s. 17 - 19.
- [3] MORRIS, A. S.: Principles of Measurement and Instrumentation. Prentice Hall (GB) 1996, pp. 470. ISBN 0-13-489709-9
- [4] NIEBUHR, J., LINDNER, G.: Physikalische Meßtechnik mit Sensoren. Oldenbourg Verlag 1994. 523 s. ISBN 3-486-21948-0
- [5] ZEHNULA, K.: Čidla robotů. Praha.
- [6] KLEMENTEV, I., KYŠKA, R.: Elektrické meranie mechanických veličín. Bratislava, Alfa 1991. 328 s.
- [7] Odborné periodiká: Technisches Messen (D), Sensors, Peterborough (USA), Automatizace, Praha (CZ), AT&P journal, Bratislava (SK), AUTOMA, Praha (CZ).

doc. Ing. Ján Šturcel, CSc.

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Tel.: 02/60 29 16 78
e-mail: jan.sturcel@kar.elf.stuba.sk