

# O PŘESNOSTI TENZOMETRICKÝCH SNÍMAČŮ SIL

Ing. Jiří Lukas CSc

Výzkumný a zkušební letecký ústav, Praha

Ukazatelem přesnosti snímačů mechanických veličin v měřicí technice je poměr velikostí výstupních signálů, způsobených rušivými veličinami ( $\sum U_{rn}$ ) a veličinou měřenou ( $U_F$ ). Tohoto "rušivého faktoru" můžeme použít ke srovnání přesnosti snímačů, využívajících různých fyzikálních principů.

Obecně je výstupní signál dán vztahem

$$U_{out} = U_0 + U_F + \sum_1^n U_{rn} \quad /1/$$

tedy součtem nulové hodnoty, užitečného signálu, určeného kalibrační závislosti a signálu, způsobeného rušivými veličinami (teplota, vlhkost ap.)

Rušivý faktor je pak dán vztahem

$$R = \frac{\sum U_{rn}}{U_F} \quad /2/$$

V oblasti snímačů sil se setkáváme převážně jednak s klasickými principy, měřícími např. kapacitně, induktivně event. piezoelektricky celkovou dráhu přetvoření, jednak s odporovými tenzometry, měřícími změnu povrchové deformace, způsobenou měřenou silou.

Nejvýraznější rušivou veličinou je změna teploty. Jak se projeví u klasických principů? Měřicí signál je úměrný rozdílu délkových změn, způsobených měřenou silou a teplotou pouzdra a teplotou měřicího členu

$$U \approx \Delta l_1(F, T_1) - \Delta l_2(T_2) \quad /3/$$

Dalším odvozením určíme rušivý faktor pro tahově nebo tlakově namáhané měřicí členy

$$R_T = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{\epsilon} \quad /4/$$

Pro běžně používané hodnoty  $\alpha \sim 10^{-5} \text{ 1/K}$  a  $\varepsilon \sim 10^{-3}$  dostaneme

$$R_T \approx 10^{-2} \frac{\Delta T}{^\circ\text{K}}$$

Chceme-li např. docílit  $R_T \approx 10^{-4}$  (současná úroveň tenzometrických snímačů), musí být  $\Delta T < 10^{-20} \text{ K}$ , a to je prakticky bez předimenzování tepelného stínění nemožné. Proto musíme volit např. ohybové nebo torzně namáhané měřicí členy, membrány a p. Jinou příčinou "špatnosti" klasických principů je to, že se měří celková délka přetvoření, ve které je skryta celá řada deformací nežádoucích. Ovlivňuje to i oblast zavádění síly, ve které je rozdělení deformací nehomogenní a silně závisí na způsobu zavedení (bod, plocha a p.). Tyto vlivy se nedají zevšeobecnit, ale je nutné je určit případ od případu, především dle geometrického uspořádání systému.

V praxi se hodnota  $R$  pro klasické systémy pohybuje okolo  $2 \div 5 \cdot 10^{-3}$ . Měří-li se dráha kapacitně, pak je třeba počítat s nelinearitou kalibrační závislosti  $\leq 10^{-5}$ , při měření indukтивním  $\sim 10^{-3}$ .

S použitím dosavadních úvah můžeme uvést některé důvody, proč se se snímači sil s kovovými tenzometry dá dosáhnout až překvapivě dobrých výsledků.

- 1) Neměří se integrální změna délky, nýbrž úzká oblast napětového pole pod tenzometry.
- 2) Aplikují se homogenní tenzometry, symetricky uspořádané.
- 3, Pro vliv teploty platí v principu též rovnice /4/, ale je možné nerovnoměrnost teploty díky malým vzdálenostem a velmi úzkému teplotnímu kontaktu tenzometrů a kompenzačních odporů s měřicím členem zmenšit pod  $10^{-2}$ .
- 4) Mohou se použít speciálně vyvinuté integrované tenzometrické systémy, tím se rušivý faktor dále zmenší.

Jak můžeme zlepšovat klasické systémy

Především se musíme snažit zmenšit vliv teploty a vliv nedokonalosti zavádění síly. K tomu se nám nabízí

- a) Použití diferenciálního uspořádání, kdy síla způsobuje pozitivní i negativní deformaci, zvýšení teploty však jenom pozitivní.
- b) Použití měřicích členů, u nichž je měřenou silou vyvolána

ohybová resp. smyková napjatost.

- c) Takové uspořádání, aby měřená deformace byla mimo oblast zavádění síly.
- d) Použití materiálů s významně menším  $\alpha$  než ocel, např. u invaru je  $R_T$  menší asi 12 krát; ještě lepší jsou materiály nekovové-keramika, sklo, křemík, zde jsou však větší problémy konstrukční.

Realizace výše uvedených zásad zlepšení je jistě velmi mnohotvárná, dá se však říct, že téměř nevycerpateľná, protože se v praxi setkáváme se stále novými a často velmi originálními nápady.

Uvedu jednu ukázkou, jak je možné docílit velmi malého rušivého teplotního faktoru. V referátu o nových prvcích tenzometrické techniky na konferenci EAM 83 jsem uvedl jako jeden v praxi se rozšiřující měřicí princip snímačů, využití vysoce nežádoucího vlivu mechanických deformací substrátu u filtrů a oscilátorů s akustickými rezonátory, používanými v přenosové a radarové technice. Jestliže vysílače a přijímače, pracující na piezoelektrickém principu v oblasti UKV naneseme na obě strany měřenou silou ohybově namáhaného nosníku, pak součtová frekvence bude téměř teplotně nezávislá. Dle údajů v literatuře se vliv teploty na jednotl. frekvence u snímače tlaku s křemíkovou membránou pohybuje okolo  $1 \cdot 10^{-9}$  1/°K. To znamená, že rušivý faktor bude při  $\varepsilon = 10^{-3}$  a  $\Delta T = 1^\circ\text{K}$  okolo  $2 \cdot 10^{-6}$ , a to je hodnota, která se snad nevyskytuje u žádného snímače síly.

### Závěr

Vynikající vlastnosti současných tenzometrických snímačů sil, které byly pro nás při stavbě prvních siloměrů před 20 lety téměř neuvěřitelné, utvrzují mnohé odborníky v přesvědčení, že pouze tenzometry nám dovolí těchto výsledků dosáhnout. Jestliže se však respektuje řada především konstrukčních zásad zde uvedených, je možné postavit dobré snímače sil i s jinými měřicími principy. Musíme při tom uvažovat i obtížnost výroby, cenové relace, možnost pracovat při vysokých teplotách a p. A při takových úvahách tenzometry vždy nezvítězí.