

Senzory s kovovými tenzometry v technické praxi

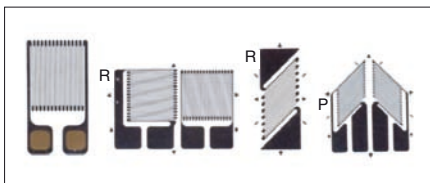
Není ve všeobecném povědomí, že významné senzory mechanických veličin s kovovými tenzometry, jako jsou senzory zatížení (pro vážení), senzory síly v tahu a tlaku, senzory krouticího momentu a senzory tlaku pro statická a nízkofrekvenční měření (do několika desítek hertzů), dosahují při vyhovující citlivosti v porovnání s jinými principy největší přesnosti a dlouhodobé stability. Významným parametrem kovových tenzometrů je jejich součinitel deformační citlivosti $k = 2,1$. Součinitel k udává vztah poměrné změny elektrického odporu tenzometru $\Delta R/R$ k poměrné změně jeho délky $\Delta l/l$, vyvolané deformací povrchu, na němž je tenzometr umístěn.

Kovové tenzometry jsou využívány i mimo uvedené senzory přímo pro měření napjatosti kriticky namáhaných strojních součástí a celých konstrukcí. Jejich signály jsou využívány jako vstupní data výpočtových metod konečných prvků k optimálnímu dimenzování mechanických konstrukcí. Zejména v zahraničí se u rozsáhlých produkcí v provozu dynamicky zatěžovaných výrobků zavádějí i další měření sledující dlouhodobou bezpečnost jejich funkce.

Stojí za připomínku, že jedno z prvních pozoruhodných rozsáhlých měření s kovovými tenzometry bylo uskutečněno na letadle Concorde při jeho vývoji v roce 1969. Za letu byly měřeny údaje z více než 1 000 tenzometrů, které byly telemetricky přeneseny na Zemi a tam číslicově zpracovány.

Metrologické vlastnosti senzorů s kovovými tenzometry

Přesnost senzorů s kovovými tenzometry je charakterizována sloučenou chybou zahrnující vliv nelinearity kalibrační závislosti



Obr. 1. Základní typy měřicích mřížek kovových tenzometrů

a hystereze. Tato chyba (vztahovaná ke jmenovité hodnotě zatěžování) je u nejpřesnějších vážicích senzorů (obr. 1) při statickém měření $0,01 \% U_n$ (jmenovitého měřicího signálu) a u běžně dodávaných senzorů $0,05$ až $1 \% U_n$. Reprodukovatelnost měření se pohybuje od zanedbatelných hodnot do $0,1 U_n$.

Dosahovaná přesnost senzorů s kovovými tenzometry je při statických měřeních zmenšována tečením (dopružováním), tj. změnou měřicího signálu při konstantním zatížení a konstantních okolních podmínkách. U kvalitních senzorů je vliv tečení potlačen na zaručovanou hodnotu např. $0,02 \% U_n$ za 30 minut. Pro mnoho průmyslových úloh je důležitý kompenzovaný teplotní rozsah, v jehož rozmezí je udávána přesnost měření. Tento rozsah běžně činí -20 až $+60$ °C a při speciálním provedení např. -20 až $+220$ °C.

Důležitým parametrem pro práci s kovovými tenzometry je i tzv. bezpečný teplotní rozsah, v němž může být senzor používán, aniž by nastaly nevratné změny jeho metrologických vlastností. Kovové tenzometry jsou zpravidla vinuty z konstantanového drátu o průměru $0,02$ až $0,01$ mm, nebo nyní častěji leptány z konstantanové fólie o tloušťce asi $0,004$ mm. Elektrický odpor těchto tenzometrů je zpravidla 120 až 600 Ω. Pro výrobu velmi citlivých senzorů se výjimečně používají senzory s odporem až několik tisíc ohmů.

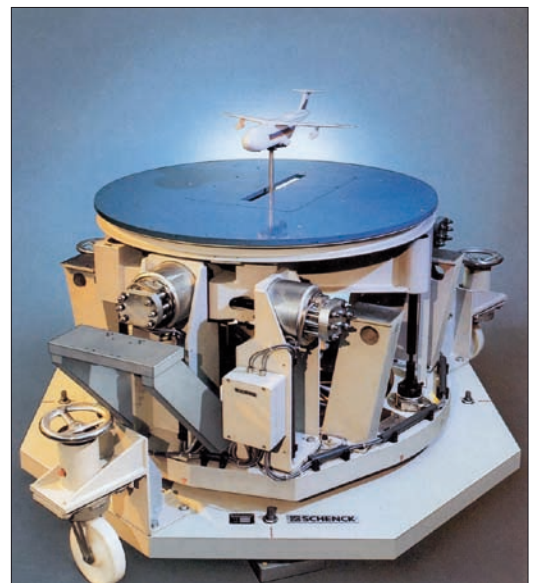
Kovové tenzometry s jednoduchou mřížkou se používají k měření jednoosých napjatostí, se speciální mřížkou k měření povrchových napjatostí při namáhání krutem (pro měření krouticích momentů). Tenzometry ve tvaru tzv. rozety, nejčastěji se dvěma tenzometry, umožňují určit hlavní napětí v neznámé rovině napjatosti. Přehled základního uspořádání měřicích mřížek kovových tenzometrů je na obr. 1.

Jako vnitřní zapojení tenzometrického měřicího systému stále převládá celomůstkové, doplněné kompenzačními prvky a napájené ze zdroje s konstantním stejnosměrným nebo střídavým napětím 6 až 30 V. Velikost jmenovitého měřicího signálu ze senzoru se pohybuje od 10 do 50 mV pro doporučené hodnoty napájení. Únavová životnost kovových tenzometrů je podle většího počtu více pramenů udávána větší než 10^6 cyklů dynamického namáhání v mezích měřicího rozsahu.

Vliv uspořádání senzorů na jejich metrologické charakteristiky

Vysoké požadavky na metrologické charakteristiky senzorů s kovovými tenzometry jsou plněny na základě výsledků náročného výzkumu v interdisciplinární oblasti. Výsled-

ky získané na hranici poznání jsou potvrzovány jen empiricky, bez jednoznačného fyzikálního zdůvodnění. Je logické, že nejpřesnější senzory jsou dodávány firmami, které s úspěchem zkoumají metodami experimentálního výzkumu efekty druhého a třetího řádu, které se u konvenčních mechanických konstrukcí zanedbávají. Vynikající příklad použití senzorů s kovovými tenzometry představují šesti-komponentní váhy pro měření sil působících v aerodynamickém tunelu (obr. 2).



Obr. 2. Špičkový senzor s kovovými tenzometry: šesti-komponentní váhy pro měření v aerodynamickém tunelu

V dalším textu je jako příklad popsán vliv hlavních částí přesných senzorů zatížení na jejich metrologické charakteristiky. Bez ohledu na jejich konstrukční řešení jsou tyto vlivy u všech zmíněných senzorů obdobné. Jde zejména o tyto:

- tvar deformačního členu, který je rozhodující pro docílení lineárního převodu síly (zatížení břemenem) na povrchovou deformaci měrného členu v místě nalepených tenzometrů a ovlivňuje i jejich dopružování,
- spojení deformačního členu s pláštěm senzoru s úkolem především eliminovat vliv parazitních radiálních a excentrických sil na měřicí signál (obr. 3), což závisí též na uspořádání měřicího obvodu s tenzometry, na jejich tvaru a umístění,
- materiál měrného členu, který má vykazovat minimální hysterezi, minimální dopružování a stálost i izotropii modulu pružnosti v tahu lineárně závislého na teplotě;

- musí mít také velkou hodnotu meze kluzu a velkou dynamickou pevnost,
- *tenzometry* mají (výběrem uspořádání a materiálu) v čase, s opakovanými zatěžovacími a teplotními cykly vykazovat konstantní metrologické vlastnosti (neměnný odpor a činitel deformační citlivosti při konstantní teplotě, minimální a determinovanou závislost těchto veličin na teplotě, minimální prokluz),
 - *funkce lepidla* je ideální, přenáší-li po celé funkční délce tenzometru trvale a věrně povrchovou deformaci měrného členu a vytváří-li dostatečný izolační odpor mezi vývody tenzometru a materiálem měrného členu; lepidla patří k tuhým kapalinám, neřídí se Hookeovým zákonem a jedním z jejich charakteristických znaků je tečení,
 - *plášť senzoru* hermeticky uzavírající prostor okolo měrného členu, zpravidla vyplněný inertním suchým plynem výrazně zpomalujícím degradační procesy, které by mohly ohrozit funkční vlastnosti i životnost měřicího obvodu senzoru; plášť senzoru také přispívá k eliminaci případných radiálních a excentrických zatížení a může působit jako mechanická pojistka při přetížení senzoru; může být konstruován pro použití senzoru i ve velmi korozivním

prostředí, popř. v prostředí s nebezpečím výbuchu,

- *kompenzační prvky*, které podstatně zmenšují nelineární závislosti mezi působícím zatížením a měřicím signálem a vliv teploty na odchylku měřicího a nulového signá-



Obr. 3. Velká přesnost senzorů zatížení není ohrožena působením parazitních sil, které jsou tlumeny elastomerovým uložením

lu nezatíženého senzoru: kompenzace jsou prováděny pasivními prvky s nelineární závislosti velikosti procházejícího proudu na teplotě a na velikosti mechanického a elektrického napětí,

- *integrováná elektronika* senzorů zlepšující jejich metrologické charakteristiky a umožňující ovládat podle velikosti měř-

ných signálů různé funkce řízeného objektu či procesu (např. programové spouštění různých řídicích či regulačních obvodů, výstražných signálů atd.); senzory s integrovanou elektronikou vystihuje název *inteligentní senzory*.

Vedle senzorů klasického provedení pro výzkum a vývoj rychle rostou počty inteligentních senzorů s integrovanou, stále častěji digitální elektronikou, významně zhodnocovaných softwarem např. pro plně automatizovanou produkci složitých strojírenských součástí, pro automatickou navigaci dopravních prostředků atd.

Senzorika v ČR

V porovnání s technicky vyspělými státy v sensorice Česká republika zaostává. Stojí za úvahu vhodné části naší podnikatelské sféry a vysokých škol technického zaměření angažovat se ve výzkumu, vývoji a produkci senzorů. Tvrzení, že nelze „vstupovat do rozjetého vlaku“, není v tomto případě na místě. Jsou prokazatelné pozitivní příklady z Finska, Švédska, Irsko a některých dalších zemí, kde byla úspěšná produkce senzorů zahájena se značným zpožděním za podobnou produkcí v SRN a v USA.

Ing. Jiří Černohorský, DrSc.

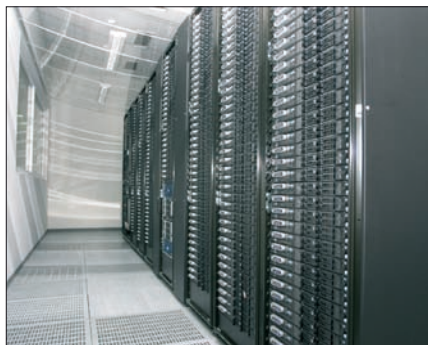
Superpočítač šetrný k životnímu prostředí

Ve Fraunhoferově ústavu pro technickou a hospodářskou matematiku ITWM (*Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik*) v Kaiserslauternu (SRN) byl nedávno uveden do provozu nový supervýkonný počítač s přelichavým názvem Herkules. Nový superpočítač, devátý nejrychlejší v Německu, patří mezi nejhospodárnější stroje svého druhu na světě. Je určen především k řešení komplexních výpočetních úloh v oblasti simulace globální reality, jako např. klimatických změn ovzduší, meteorologických jevů v souvislosti s dlouhodobými předpověďmi počasí apod. Je však vhodný i ke zpracování seismických dat pro ropný průmysl nebo pro počítačovou podporu komplexních inženýrských projektů pro automobilky, výrobu strojů, podniky textilního průmyslu apod.

Superpočítač Herkules i nově postavená budova ITWM, v níž je umístěn, jsou navrženy v souladu se zásadami moderní, „zeleňé“ koncepce ústavu.

Ve spolupráci s firmou Dell se do jednoho superpočítače podařilo propojit 272 energeticky mimořádně účinných samostatných počítačových serverů. Zvoleny byly především úsporné napájecí zdroje, dvoujadrové procesory s malým odběrem proudu a také paměťové mechaniky s velmi malou spotřebou energie. Pro každý počítač jsou použity nejvýše čtyři paměťové moduly, což také

znamená menší spotřebu energie. Počítače pracují pod operačním systémem Linux při výkonu až 8,1 teraFLOPS. Přitom nebyly v počítačích záměrně použity nejrychlejší procesory dostupné na trhu, ale procesory, které se vyznačují největším výkonem na jednotku příkonu.



Obr. 1. Nový superpočítač Herkules se skládá z 272 počítačů (foto: Fraunhofer ITWM)

Budova výpočetního střediska ITWM především optimálně využívá světlo i teplo z dopadajícího slunečního záření. Současně zajišťuje energetické potřeby budovy (elektrický proud, teplo, chlazení) kombinovaná plynová kogenerační jednotka s velkou účinností. Inteligentní systém větrání s rekuperací odpadní-

ho tepla zčásti nahrazuje energeticky náročnou klimatizaci uvnitř budovy. K úsporám energie při provozu budovy významně přispívá účinné chlazení prostoru se superpočítačem. Systém funguje tak, že až do teploty venkovní atmosféry 20 °C jsou místnosti s počítačem chlazeny přímo vnějším vzduchem. Jestliže je tepleji, obstarává chlazení kombinovaná kogenerační jednotka prostřednictvím absorpčního chladičového systému. V chladnějších dnech se naopak odpadní teplo z počítačů účelně využívá k přitápění vnitřku budovy. Úspěšnou instalaci superpočítače Herkules odborníci Fraunhoferova ústavu ITWM názorně předvedli, že je možné stavět a provozovat moderní superpočítače, které mají obrovský výpočetní výkon a současně jsou úsporné i šetrné k životnímu prostředí.

Mezi superpočítači ve světě je Herkules co do výpočetního výkonu na 244. místě (vrcholových 500 z listopadu 2007). Ohledně ekologických vlastností je ale ve světě na 48. místě, když na první pozici je superpočítač BlueGene z produkce firmy IBM s měrným výkonem 112 milionů FLOPS na jeden watt příkonu. Superpočítač Herkules je mu těsně v patách s vynikajícím měrným výkonem 100 milionů FLOPS na jeden watt příkonu.

[*Der grüne Herkules*. Mediendienst FhG, Nr. 12–2007, Thema 4.]

Kab.