

Zkušebnictví a měřicí technika mechanických veličin ve strojírenství

Denně jsme svědky nepřetržitého úsilí mnoha strojírenských podniků překonávat konkurenci ve funkčních parametrech vlastních výrobků, v jejich spolehlivosti, životnosti, designu i ceně. V technicky vyspělých státech politici více či méně úspěšně usilují o zavedení trvalého proinovačního prostředí podporujícího soustavný technický pokrok, jenž se projevuje vznikem nových materiálů a dokonalejších konstrukcí nových výrobků s lepšími provozními parametry, zejména velkou spolehlivostí a dlouhou dobou života, i pozoruhodným designem. Významnou roli, neboť ovlivňuje výrobní náklady, má zavádění moderních výrobních technologií.

Pozice úspěšného výrobce závisí na úrovni vlastního výzkumu a vývoje

Má-li výrobce dodávat na světový trh výrobky, které obstojí v tvrdé inteligentní konkurenci, musí vhodně pečovat o vlastní výzkumnou a vývojovou základnu, aby byla



Obr. 1. Šestikomponentní váhy měří v aerodynamickém tunelu v toku proudícího vzduchu velmi přesně síly a momenty působící na modely či reálné automobily nebo letadla

schopna na mezinárodní úrovni řešit všechny problémy rozhodující o postavení výrobce na trhu.

Výzkum by měl poskytovat konstruktérům ve vývoji a zkušebním technikům aktuální informace o možnostech novátorského řešení prototypu výrobku, o metodách jeho zlepšování a zkracování procesu vývoje, o vlastnostech nových materiálů a o výsledcích dosahovaných konkurenčními firmami. Tato první fáze výzkumu, podpořená experimenty, je dlouhodobě zdokonalována a její výsledky tvoří podstatnou část know-how firmy. Vyústěním výzkumného a vývojového procesu by měl být prototyp výrobku postavený

podle optimalizovaného návrhu a obsahující všechny podstatné vlastnosti konečného výrobku (obr. 1).

Ve druhé fázi výzkumu a vývoje – ověřování prototypu experimentem – podrobuje výrobce prototyp náročným zkouškám v provozních podmínkách simulovaných v laboratořích. Při těchto zkouškách, zejména při simulovaném provozním limitním zatěžování výrobků, lze posoudit míru shody matematického modelu s realitou a získat informace o případných konstrukčních a technologických nedostatcích, které vedou k úpravě prototypu.

Je třeba zdůraznit dvě méně známé a ne vždy doceňované skutečnosti:

- správná příprava experimentu, jeho provedení a objektivní zhodnocení vyžadují vysoce kvalifikované a erudované pracovníky zajišťující teoretické základy přípravy i vlastní zkoušky,
- experiment má smysl jen tehdy, vykazuje-li metrologický charakter; to klade značné požadavky i na snímače mechanických i jiných měřených veličin.

Moderní zkušebnictví se vyvíjelo od padesátých let

Praxe prokázala, že i ten nejsložitější výpočet mechanické konstrukce stroje bez ověření experimentem jen aproximuje skutečný stav. Ve výpočtovém modelu nelze zohlednit všechny vlivy působící na mechanickou konstrukci výrobku, např. účinky prostředí, v němž je výrobek používán, jsou zpravidla složitější, než lze postihnout matematickým modelem.

V počátcích moderního zkušebnictví v padesátých letech minulého století byla v našem leteckém a automobilovém průmyslu budována pracoviště zabývající se vývojem a produkcí komponent měřicí techniky mechanických veličin. Ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu a v Ústavu pro výzkum motorových vozidel byly vyvíjeny snímače a elektronika pro měření parametrů mecha-

nického kmitání, pro automatické zpracování a záznam naměřených dat a zařízení pro programované generování proměnného mechanického zatížení.

V té době vznikaly v USA, v Evropě a v Japonsku prestižní firmy, které začaly vyrábět snímače a elektroniku pro experimenty v leteckém a automobilovém průmyslu a v dalších oborech strojírenství (kolejová vozidla, zemní stroje, zbraňová technika atd.). V leteckém průmyslu byla současně vyvíjena speciální měřicí technika mechanických veličin trvale využívaná v leteckém výzkumu.

Pro dimenzování a konstruování strojírenských výrobků byl velmi důležitý vynález kovového odporového tenzometru, který Američané Simons a Ruge představili v roce 1937



Obr. 2. Přenos měřících signálů z tenzometrů přilepených na listech vrtule s použitím sběrných kroužků

a o dva roky později zavedli do sériové výroby v několika podnicích v USA a v Kanadě. Tím bylo umožněno účinnými experimenty optimalizovat dimenzování dílčích komponent i celých strojů s ohledem na jejich provozní bezpečnost (obr. 2).

První rozsáhlé experimenty prokazující mechanickou pevnost a spolehlivost celých složitě namáhaných výrobků při jejich standardním, či dokonce extrémním provozním zatížení byly uskutečněny počátkem šedesátých let. Na základě výsledků měření jejich kompletního namáhání převážně kovovými tenzometry byla určena kritická místa dané konstrukce a provedeny úpravy zvyšující její pevnostní a spolehlivostní charakteristiky při dodržení minimální hmotnosti a s využitím nevhodnějších konstrukčních materiálů tak, aby bylo dosaženo požadované doby provozního života výrobku. V tomto období se výrazně změnila počty odborníků v předvýrobních etapách i jejich kvalifikační struktura. Vzrostl počet strojních inženýrů a nastoupili i inženýři elektroniky zabývající se měřicí technikou.

Všechny světové automobilky a finální letecké podniky v současné době disponují roz-

sáhlými zkušebními, v nichž jsou podrobně měřeny parametry charakterizující spolehlivý provoz automobilů, letadel apod. a všech jejich důležitých částí. Současně jsou zkoušeny prvky aktivní a pasivní bezpečnosti pasažérů, řidičů v automobilech a pilotů v letadlech a navrhována a realizována opatření bránící rušení jejich pohodlí vibracemi či hlukem.

Snímače mechanických veličin

Snímače mechanických veličin transformují sílu, tlak, dráhu a parametry mechanického kmitání na elektrický signál odpovídající velikostí a tvarem a umožňují metodami běžnými v elektronice ho změřit, zobrazit, popř. automaticky zpracovat.

Snímač je popisován metrologickými charakteristikami stanovujícími hlavní parametry jeho funkce: měřenou fyzikální veličinu, amplitudový a frekvenční rozsah, citlivost a přesnost měření, stálost metrologických charakteristik s časem, citlivost snímače na působení parazitních fyzikálních veličin (např. teploty, hluku, magnetického pole atd.).

Nejpoužívanější principy a konstrukční provedení snímačů vycházejí z požadavků na jejich optimální fungování. Jde o snímače, které po několik desítek let nedoznaly podstatnějších změn. Jejich metrologické charakteristiky jsou dány použitým principem a mechanickou konstrukcí (obr. 3).

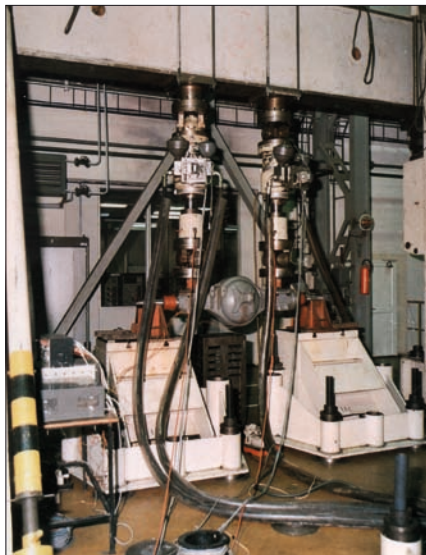
Využívány jsou principy piezoelektrický, piezorezistentní, indukční, kapacitní a s kovovými odporovými tenzometry, které umožňují měřit síly, tlaky, posunutí, natočení a parametry kmitavého pohybu (amplitudy, rychlosti a zrychlení) v dostatečném frekvenčním rozsahu. Podrobné informace o všech metrologických charakteristikách snímačů poskytují v dostatečné míře jejich výrobci.



Obr. 3. Silové působení mezi kolejovým vozidlem a tratí za jízdy se měří s použitím měrných dvojkolí; obrázek ukazuje cejchování měrného dvojkolí pro motorový železniční vůz

Se zvládnutelnými problémy lze měřit ve frekvenčním rozsahu od statického signálu, přes nejnižší frekvence po frekvence do 100 Hz až 10 kHz s citlivostí určenou principem snímače a závislou na hodnotě vlastní frekvence měřicí soustavy.

Na značném pokroku v oblasti automatizace funkcí různých výrobků a procesů se



Obr. 4. Zařízení pro zkoušení náprav nákladních automobilů a autobusů

významně podílejí tzv. inteligentní snímače s integrovanou, stále častěji digitální mikroelektronikou. Jejich metrologické charakteristiky jsou metodicky zdokonalovány. Na základě změřených údajů mohou inteligentní snímače přímo ovládat zvolené funkce, např. programově spouštět různé regulační obvody, výstražné signály atd. Snímače a jejich informační, regulační a řídicí systémy jsou významně zhodnocovány softwarem. Takové inteligentní snímače s mikromoduly jsou používány v plně automatizované výrobě složitých strojních součástí, při automatické navigaci dopravních prostředků, ve zkušebnictví, v mnoha výrobních procesech v chemickém průmyslu apod.

Aktuální je standardizace používaných mikromodulů. Dosavadní mikromodulová technika se při různorodosti výrobků vyznačuje malými sériemi snímačů s nedostatečně flexibilním (neekonomickým) řešením mikromodulů. V současné době se prosazují flexibilní mikromoduly sjednocené na všeobecných standardních rozhraních, která umožňují vytvářet z rozličných mikromodulů snímače jako vyšší modulární celky.

Pokroky v řešení a využívání zatěžovacích zkušebních systémů

V současné době lze ve výzkumu většiny strojírenských výrobků stanovit dva hlavní trendy: optimální konstruování a automatickou činnost výrobků.

Při optimálním konstruování je kladen důraz na zkoušky životnosti a spolehlivosti celých výrobků a na jejich napětové (deformační) analýzy, jež jsou prováděny s použitím vícekanálových elektrohydraulických za-

těžovacích systémů. Zkoušky materiálových vlastností a napětová analýza součástek strojů jsou vykonávány na elektrohydraulických strojech (až tříkanálových, obr. 4). Elektrohydraulické systémy a stroje dodávají firmy Material Testing Systems (MTS) z USA, Instron Schenck Testing Systems z Německa a česká firma Inova. Modální zkoušky dynamického chování konstrukcí jsou prováděny na zařízeních francouzské firmy Prodera při harmonickém a impulzním buzení až v osmi bodech a měřením odezvy konstrukce až v 500 bodech současně. V posledních letech jsou aktuální zkoušky zaměřeny na vývoj kompozitních dílů určených k použití v letectví i mimo ně.

Elektrohydraulické systémy jsou řízeny výhradně číslicovými obvody, jejichž funkce zahrnuje číslicovou regulaci řídicích signálů a sběr a zpracování signálů ze snímačů mechanických veličin. Signály ze snímačů jsou jednak určeny k řízení experimentu, jed-



Obr. 5. Měření spolehlivosti a životnosti osobního automobilu na dvanáctikanálovém elektrohydraulickém zkušebním systému

nak mapují rozložení mechanického zatížení konstrukcí. Pro tato měření jsou elektrohydraulické systémy vybaveny extrémně rychlými měřicími ústředními pro sběr a zpracování dat z tenzometrů i ze snímačů síly, dráhy a zrychlení. Ve vývoji automobilů jde o elektrohydraulické systémy se čtyřmi až šestnácti kanály (obr. 5). Ve vývoji nejnovějších velkých dopravních letadel jde až o řádově rozsáhlejší systémy. Jejich dominantní úlohou je simulovat skutečné či předpokládané provozní zatěžování zkoumaných objektů.

Ve strojírenském výzkumu a vývoji jsou též aktuální algoritmy zatěžování v režimu tzv. mezních stavů. Funkce elektrohydraulických systémů je v praxi charakterizována složitým mnohparametrovým zatěžováním objektu, který zpravidla vykazuje větší počet vlastních frekvencí a módů kmitání, nelineární tlumení a výrazné interakce mezi působícími jednotlivými hydromotory. Tyto a popř. další vlivy jsou zohledněny vytvořením syntetických řídicích signálů odvozených ze zadaných parametrů zkoumaného objektu zjištěných při jeho provozu měřením (nejčastěji časově proměnných deformací, sil, výchylek)

na určených místech konstrukce. Povahy experimentů s využitím elektrohydraulických systémů vyžaduje, aby všechny hydromotory byly programovány nezávisle.

Mezi zkoušky mechanických konstrukcí dynamicky namáhaných výrobků především patří:

- zkoušky spolehlivosti a životnosti mechanických konstrukcí a jejich částí,
- modální analýza kmitavých pohybů konstrukcí,
- zkoušky pro stanovení mezního namáhání určující mezní režimy exploatace dané konstrukce,
- zkoušky pasivní bezpečnosti, z nichž nejvýznamnější je tzv. bariérová zkouška (*crash test*).

V současné době se inteligentní snímače používají podstatně častěji k automatizaci činnosti strojů než ve výzkumu a vývoji ve strojírenství.

Dynamické zkušebny s elektrohydraulickými systémy v České republice

Experimenty zaměřené na zjišťování spolehlivosti a životnosti strojírenských výrobků, na podporu moderních výpočtových metod jejich dimenzování a na zjišťování únavových charakteristik konstrukčních materiálů se průběžně uskutečňují i v českých dynamických zkušebnách. Tyto zkušebny jsou u nás vybudovány v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, u výrobců kolejových vozidel a v některých dalších strojírenských oborech, a to se značnými náklady, protože experiment podmiňující rychlost vývoje nového výrobku, jeho spolehlivost, životnost a design může být rozhodující technickou výhodou v porovnání s konkurencí. Experimentální výzkum ovlivňuje rychlost a kvalitu inovačních procesů i náklady na výrobek. Často se využívá i k ověření parametrů konkurenčních výrobků.

Dynamické zkušebny v ČR jsou koncipovány skromněji než zkušebny např. v Německu, ve Francii nebo v Itálii, kde největší zkušebny jsou vybaveny systémy zahrnujícími každý celkem asi 200 hydromotorů. Naše zkušebny jsou z technického hlediska vyba-

veny srovnatelnou technikou, ovšem s možnostmi využívat zkušební systémy s menším počtem hydromotorů. Úroveň realizovaných experimentů i teoretického zájmu zkušeben koncipujícího průběhy i cíle experimentální činnosti je přitom zcela srovnatelná s úrovní v zahraničí.

V ČR působí pět zkušeben vybavených zatěžovacími zkušebními systémy pro experimenty s celými výrobky (nebo jejich podstatnými částmi) zatěžovanými několika hydromotory a asi dvacet zkušeben vybavených až tříkanálovými zatěžovacími stroji pro zkoušky vzorků materiálu a součástí. Uvedených pět velkých zkušeben je takto vybaveno:

- ve Škoda Auto Mladá Boleslav je elektrohydraulický systém se čtrnácti hydromotory, dva šestikanálové elektrohydraulické systémy a další elektrohydraulické stroje; vykonávají se zde zkoušky spolehlivosti a životnosti automobilů a jejich částí,
- ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu (VZLÚ) v Praze-Letňanech je v provozu elektrohydraulický systém se 40 hydromotory, elektrohydraulický systém se dvanácti hydromotory a elektrohydraulický systém se šesti hydromotory; zkušebna je zcela vytížena zakázkami leteckých organizací z EU a též domácími zakázkami z různých strojírenských podniků,
- ve Škoda Výzkum Plzeň je elektrohydraulický systém s dvanácti kanály a další menší elektrohydraulické systémy; prováděny jsou pevnostní zkoušky podvozků lokomotiv a vagonů, statické a dynamické zkoušky karoserií a dalších konstrukčních dílů autobusů a nákladních automobilů a pevnostní zkoušky železniční techniky mj. pro zákazníky z Německa a Austrálie,
- v podniku Tatra Kopřivnice je elektrohydraulický systém se čtyřmi hydromotory a několik menších elektrohydraulických strojů; prováděny jsou pevnostní zkoušky kabin a dalších konstrukčních částí nákladních automobilů,
- ve Výzkumném ústavu železničním (VÚŽ) v Cerhenicích je elektrohydraulický systém s dvanácti hydromotory, elektrohydraulický systém s osmi hydromotory a několik menších elektrohydraulických strojů; uskutečňují se zde předepsané zkoušky ce-

lých kolejových vozidel i jejich částí, zejména podvozků.

V několika posledních letech jsou ve strojírenských podnicích v ČR vytvářeny pro zkušebnictví příznivější podmínky, projevující se větším využitím experimentální techniky pro výzkum a vývoj českých výrobků i pro zahraniční zákazníky (nejčastěji z Německa), jejichž důvěra je povzbuzující. Stavbou zkušeben na technických univerzitách v Praze a v Brně vznikly předpoklady ke vzdělávání budoucích inženýrů v této oblasti, velmi důležité pro zdokonalování strojírenských výrobků, a k navázání spolupráce podnikových útvarů výzkumu a vývoje s vysokými školami v oboru, jehož rozvoj zvyšuje úroveň celého strojírenství.

Menší zkušebny vybavené jen zatěžovacími stroji zaměřenými na statické a kvazistatické zkoušky konstrukčních materiálů a v menší míře na zkoušky tlumičů jsou v porovnání s minulostí využívány ve výrazně větší míře, což je způsobeno větším objemem výzkumu, vývoje a navazující výroby v českých podnicích.

Místo závěru

V roce 1959 předložil Richard Feynman první vizi nanotechnologie. V současné době je pojem nanotechnologie označována oblast vědy, která se zabývá cílenou a přesnou manipulací s jednotlivými atomy a molekulami tak, aby vznikl nový objekt. Například integrovaný obvod tisíckrát menší než obvod vyráběný konvenčními technologickými postupy. Potenciální využití nanotechnologií už v blízké budoucnosti (několika desítek let) významně ovlivní snímačovou techniku, pevnostní charakteristiky inteligentních kompozitních materiálů, způsoby řešení elektronických přístrojů, techniku počítačů a desítky dalších oborů. Žádný dosud známý vědní obor neměl tak významné pozitivní perspektivy pro budoucnost lidstva, jako má nanotechnologie. Požadavky na zkoušky odolnosti soustav při jejich dynamickém zatěžování se přechodem k nanotechnologiím posunou do zatím ještě netušených poloh.

Ing. Jiří Černohorský, DrSc.
(cernohorsky.jiri@gmail.com)

► Doporučení NE 121 aneb jak zvolit řídicí systém

Mezinárodní sdružení výrobců a uživatelů automatizační techniky NAMUR vydalo doporučení pod označením NE 121, které radí uživatelům, jak postupovat při pořizování systémů pro řízení průmyslových procesů a při jejich vlastním provozování, aby byly následně náklady co nejnižší. Do-

poručení platí pro automatické systémy založené na platformách současné informační techniky, které jsou o úroveň níže než systémy podnikového plánování ERP. Jde tedy o distribuované řídicí systémy, systémy pro řízení šarží, pro integraci procesních přístrojů a detailní provozní plánování. Cílem doporučení NE 121 je ochránit investice provozovatelů řídicích systémů a snížit náklady na celou dobu života systému a zároveň je chránit před výrobními ztrátami způsobenými

neplánovanými výpadky. Podle doporučení musí uživatel správně stanovit své požadavky na řídicí systém a podle nich systematicky postupovat při výběru systému i při důležitých opatřeních, jako je přechod na novou verzi softwaru (*upgrade*), rozšiřování systému nebo migrace. Pro stanovení těchto požadavků je záhodno používat dobře známé řídicí nástroje pro zajištění kvality a kontrolu zastarávání (obsolescence) řídicích systémů podle mezinárodních norem. (ev)