

APPLICATION OF THE EXPERIMENTAL IDENTIFICATION METHOD FOR MIMO SYSTEMS

M. Tanzer*, P. Macák*

Summary: *This contribution describes the experimental indirect identification method for linear damped dynamic systems with multiple inputs and multiple outputs (so called MIMO systems). This method is based on the smoothing and identification of the real measured frequency response functions (FRF) in single measured points (i.e. SISO systems), their sorting into FRF matrix, its transform into the time domain and the complex identification of the system from the impulse response matrix. The used program was developed in MATLAB 5.3. This program is completed by the spatial animation of the identified mode shapes.*

The methodology was used for the evaluation of measurement on the experimental model of the reactor VVER 1000 cooling loop. The results were evaluated by method for SIMO systems. Next application was measurement at the real structure of the upper block of the reactor VVER 1000. This structure was identified as a MISO system. The results of both experiments were compared with the results of independent measurement evaluations and they present very good accord both in the frequency values and in the identified mode shapes.

1. Úvod

Pojmem *experimentální identifikace*, užívaným v tomto příspěvku, je označen postup, patřící do kategorie nepřímé identifikace, který umožňuje z hodnot odezev naměřených na vyšetřované konstrukci při známém buzení stanovit její frekvenčně-modální vlastnosti.

V současné době je asi nejrozšířenější metodou využívanou pro experimentální identifikaci metoda experimentální modální analýzy (EMA), která je běžně využívána ve dvou variantách - pro systémy s jedním vstupem a mnoha výstupy (SIMO systémy), anebo pro systémy s mnoha vstupy a jedním výstupem (MISO systémy). Tyto komerčně dostupné procedury řeší identifikaci ve frekvenční oblasti a jejich výhodou je relativní jednoduchost i robustnosti jejich použití. Jejich nevýhoda spočívá v tom, že celý systém je identifikován ve většině případů po částech jako sestava systémů s jedním, případně se dvěma stupni volnosti.

* Ing. Michal Tanzer, Ph.D., Ing. Pavel Macák, Ph.D.: ŠKODA JS a.s.; Orlík 266; 316 06 Plzeň;
tel.: +420 378 042 569; e-mail: michal.tanzer@skoda.cz, pavel.macak@skoda.cz

Příspěvek se zabývá aplikací metodiky, použitelné pro proces identifikace systémů s mnoha vstupy i mnoha výstupy (MIMO systémy), tj. soustavy buzené i měřené ve více místech a to buď současně, nebo i postupně. Na rozdíl od metody EMA, pracující ve frekvenční oblasti, je tato metodika založena na analýze matice impulzních odezev, tedy na informaci z časové oblasti. Celý systém je identifikován komplexně, jako celek navzájem se ovlivňujících vlastních frekvencí i vlastních tvarů kmitání. Identifikace SIMO a MISO systémů jsou potom speciálními případy této metodiky.

Vstupní data uvedené metodiky tvoří sada frekvenčních přenosů $\mathbf{g}_{ij}(k\Delta\omega)$ mezi místy buzení (j) a místy měření odezvy (i). Identifikace pak probíhá ve čtyřech krocích:

- 1) je vypočten tzv. **součtový frekvenční přenos** jako jakási globální charakteristika systému, a v něm je odhadnut počet a poloha hledaných vlastních frekvencí
- 2) je provedeno **vyhlazení** jednotlivých frekvenčních přenosů převedených do tvaru výchylky
- 3) frekvenční přenosy jsou uspořádány do matice $\mathbf{G}(k\Delta\omega)$, tato matice je převedena na matici impulzních odezev $\mathbf{G}(n\Delta t)$ a metodikou pro **nepřímou identifikaci MIMO systémů** v časové oblasti jsou určeny odhady komplexních vlastních čísel a pravostranných vlastních vektorů
- 4) provede se zobrazení výsledků formou **animace** identifikovaných vlastních tvarů kmitání geometrického modelu zkoumané konstrukce

2. Metoda identifikace MIMO systémů

2.1 Součtový frekvenční přenos

Pro první odhad počtu a polohy významných vlastních frekvencí systému je proveden výpočet tzv. součtového frekvenčního přenosu:

$$\text{Sum}\{\mathbf{g}(k\Delta\omega)\} = \sum_i |\mathbf{g}_{ij}(k\Delta\omega)|, \quad (1)$$

kde $|\mathbf{g}_{ij}(k\Delta\omega)|$ je modul průměrovaného měřeného frekvenčního přenosu, i je index měřených signálů odezvy a j je index měřených signálů buzení.

Součtový frekvenční přenos tvoří základní globální charakteristiku systému, ve které jsou nalezeny vrcholy, pro jejichž frekvence je smysluplné provádět další identifikaci. Je účelné zobrazovat součtové spektrum ve formě rychlosti (tzv. mobility), neboť takto jsou nejvyrovnaněji zobrazovány rezonanční vrcholy v oblasti relativně nízkých i vysokých frekvencí.

2.2 Vyhazení frekvenčních přenosů

Při zpracování dat významně zatížených chybami měření se projevila potřeba vyhlazení (regrese) jednotlivých naměřených frekvenčních přenosů před vlastním procesem identifikace. Metodika regrese je založena na identifikaci systémů s jedním vstupem a jedním výstupem (SISO systémy), při níž se mají z měřeného frekvenčního přenosu určit vlastní čísla testovaného systému (konstrukce) a jeho citlivost na dané buzení.

Následující stručně naznačená metoda nepřímé identifikace SISO systémů byla rozpracována na pracovišti ÚT AV ČR v Praze (Kozánek, 1995), dále upravena a rozvinuta na pracovišti ÚT AV ČR v Plzni (Balda, 1999) a odladěna a prakticky ověřena ve ŠKODA JS a.s. (Tanzer, 2000).

Odezvu systému v místě i na buzení v místě j lze ve frekvenční oblasti zapsat jako:

$$q_i(\omega) = \mathbf{v}_i^T [i\omega\mathbf{I} - \mathbf{S}]^{-1} \cdot (\mathbf{w}_j^T)^H \cdot f_j(\omega) = \sum_{n=1}^{2n} \frac{v_{in} \omega_{jn}^C}{i\omega - s_n} \cdot f_j(\omega) = \sum_{n=1}^{2n} \frac{a_{ijn}}{i\omega - s_n} \cdot f_j(\omega), \quad (2)$$

kde \mathbf{v}_i , resp. \mathbf{w}_j jsou, řádky resp. sloupce pravostranné, resp. levostranné modální matice, \mathbf{S} je diagonální maticí pólů obsahující komplexní vlastní čísla a $f_j(\omega)$ je j -tý prvek vektoru Fourierova obrazu buzení.

Identifikace, tj. nalezení neznámých s_n a a_{ijn} , se provede minimalizací sumy kvadrátů reziduí mezi analytickou náhradou $\mathbf{g}_{ijC}(\omega)$, a dílčím frekvenčním přenosem $\mathbf{g}_{ij}(\omega)$, určených jako:

$$\mathbf{r} = \mathbf{g}_{ijC}(\omega) - \mathbf{g}_{ij}(\omega) \Rightarrow r_{ij}(\omega) = \left(\sum_{n=n_a-1}^{n_b+1} \frac{a_{ijn}}{i\omega_k - s_n} \right) - g_{ij}(\omega), \quad (3)$$

kde n_a a n_b jsou krajní indexy vlastních frekvencí ve vyšetřovaném frekvenčním intervalu.

Ze vztahu (3) vyplývá, že bude identifikováno o dvě vlastní čísla více, než je obsaženo ve vyšetřovaném frekvenčním intervalu. Důvodem je potřeba korigovat příspěvky vlastních frekvencí, ležících vně vyšetřovaného frekvenčního intervalu.

Vektory neznámých regresních koeficientů jsou

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} \mathbf{s} \\ \mathbf{a} \end{bmatrix}, \quad \text{kde } \mathbf{s} = [s_n] \quad \text{a} \quad \mathbf{a} = [a_{ijn}], \quad n = n_a-1, \dots, n_b+1. \quad (4)$$

Po určení neznámých regresních koeficientů \mathbf{s} a \mathbf{a} je výsledkem vyhlazený frekvenční přenos $\mathbf{g}_{ijC}(\omega)$, který je prvkem matice frekvenčních přenosů $\mathbf{G}_C(\omega)$.

2.3 Identifikace MIMO systému

Použitá metodika identifikace MIMO systémů byla poprvé publikována v příspěvku (Balda, 1999).

Předpokládejme, že výsledkem experimentu je časová řada matic impulsních odezev odebíraných s pevnou periodou vzorkování Δt , a že tuto řadu lze zapsat ve tvaru:

$$\mathbf{G}(k\Delta t) = \mathbf{V} \cdot \exp(k\mathbf{S}\Delta t) \cdot \mathbf{W}^H, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (5)$$

kde N je počet submatic $\mathbf{G}(k\Delta t)$, a tedy i vzorků v každém prvku této maticové časové řady.

2.3.1 Odhad vlastních čísel

Pokud bychom použili postupně n libovolných nezávislých kombinací buzení v n vybraných bodech zkoumané konstrukce, dostali bychom maticovou časovou řadu buzení $\mathbf{F}(k\Delta t) \in \mathbf{R}^{n,n}$ a jí odpovídající maticovou časovou řadu odezev $\mathbf{Q}(k\Delta t) \in \mathbf{R}^{m,n}$, přičemž odezva dynamické soustavy v časové oblasti $\mathbf{Q}(k\Delta t)$ je dána konvolucí impulsní odezvy $\mathbf{G}(k\Delta t)$ s buzením $\mathbf{F}(k\Delta t)$:

$$\mathbf{Q}(k\Delta t) = \Delta t \cdot \sum_{k=0}^k \mathbf{G}((k-k)\Delta t) \mathbf{F}(k\Delta t) = \Delta t \cdot \mathbf{V} \sum_{k=0}^k \exp((k-k)\mathbf{S}\Delta t) \mathbf{W}^H \mathbf{F}(k\Delta t) \quad (6)$$

Předpokládejme nyní, že pro buzení byly použity Diracovy impulsy. V diskrétním modelu to znamená, že $\mathbf{F}(0) = \mathbf{I}_n$ a $\mathbf{F}(k\Delta t) = \mathbf{O}_n$ pro $k > 0$. Hledejme nyní taková buzení $\mathbf{F}(k\Delta t)$, všechna řádu n , která budou schopna systém vybuzený v čase $t = 0$ sérií impulsů $\mathbf{F}(0) = \mathbf{I}_n$ uvést do klidu v následujících p vzorkovacích periodách, a tedy způsobit, že odezva na počáteční impulsy $\mathbf{F}(0)$ bude po následujícím fiktivním buzení $\mathbf{F}(k\Delta t)$, $k = 1, \dots, p$ již nulová, tedy $\mathbf{Q}(k\Delta t) = \mathbf{O}_{m,n}$ pro $k = p+1, p+2, \dots$. Po rozepsání podmínky $\mathbf{Q}(k\Delta t) = \mathbf{O}_{m,n}$ pro $k = p+1, \dots, N-1$, dostaneme soustavu rovnic:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_p & \mathbf{G}_{p-1} & \mathbf{L} & \mathbf{G}_0 \\ \mathbf{G}_{p+1} & \mathbf{G}_p & \mathbf{L} & \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ \mathbf{G}_{N-1} & \mathbf{G}_{N-2} & \mathbf{L} & \mathbf{G}_{N-p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{F}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{m,n} \\ \mathbf{O}_{m,n} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{O}_{m,n} \end{bmatrix}, \text{ kde } \mathbf{G}_k = \mathbf{G}(k\Delta t) \quad (7)$$

Po několika rozsáhlejších úpravách a při použití vztahu:

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{W} \exp^H(k\mathbf{S}\Delta t), \quad (8)$$

vede úloha na problém vlastních hodnot \mathbf{Z} a jim odpovídajících vlastních vektorů \mathbf{E} :

$$\mathbf{A}\mathbf{E} = \mathbf{E}\mathbf{Z} \quad (9)$$

Po vyřešení výše uvedené soustavy rovnic (9) určíme z prvních $n_e = 2n_f$ uspořádaných vlastních hodnot z matice \mathbf{Z} spektrální matici \mathbf{S} původní úlohy identifikovaného systému jako:

$$\mathbf{S} = f_s \ln(\mathbf{Z}^H), \quad (10)$$

Vlastní frekvence f_n a odpovídající poměrné útlumy D_n se určí z identifikovaných komplexních vlastních čísel s_n :

$$f_n = \frac{1}{2p} \cdot \text{Im}(s_n) \text{ [Hz]}, \quad D_n = \left| \frac{\text{Re}(s_n)}{|s_n|} \right| \cdot 100 \text{ [%]} \quad (11)$$

2.3.2 Odhad modálních matic

Levostrannou modální matici \mathbf{W} vypočteme z rovnice (8):

$$\mathbf{W} = \mathbf{E}_{p-1} \cdot \exp^{-H}((p-1)\mathbf{S}\Delta t), \quad (12)$$

pravostranná modální matice \mathbf{V} se určí ze vztahu (5) řešením přeúřčeného systému algebraických rovnic:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{G}(k\Delta t)] \cdot [\exp(k\mathbf{S}\Delta t) \mathbf{W}^H]^+ \quad (13)$$

2.4 Animace geometrického modelu

Identifikovaná pravostranná modální matice \mathbf{V} vstupuje do procedury, která současně využívá zadané parametry geometrického modelu, a pro jednotlivé zjištěné frekvence umožňuje názornou prezentaci výsledků formou vykreslení nebo prostorové animace jednotlivých odhadů vlastních tvarů kmitů. Dalšími vstupními daty procedury je pole vlastních frekvencí f_n a odpovídajících poměrných útlumů D_n .

Vlastní tvary jsou animovány užitím modulů a_i a fází j_i ve všech měřených bodech (i) vypočtených z odpovídajících vlastních vektorů \mathbf{v}_i , obsažených v matici \mathbf{V} :

$$a_{in} = |v_{in}| \quad , \quad j_{in} = \text{atan} \left(\frac{\text{Im}(v_{in})}{\text{Re}(v_{in})} \right) \quad (14)$$

Uvedené kroky metody identifikace MIMO systémů byly algoritmizovány a naprogramovány v prostředí MATLAB 5.3. S využitím funkcí obsažených v Optimization Toolbox a Signal Processing Toolbox byly vytvořeny moduly pro zpracování až 48 simultánně měřených signálů a vyhodnocení i animaci vlastních tvarů kmitání. Moduly poskytují uživatelsky příjemné prostředí aplikace pro MS-Windows a umožňují rutinní zpracování navzorkovaných časových průběhů signálů.

3. Experimentální práce

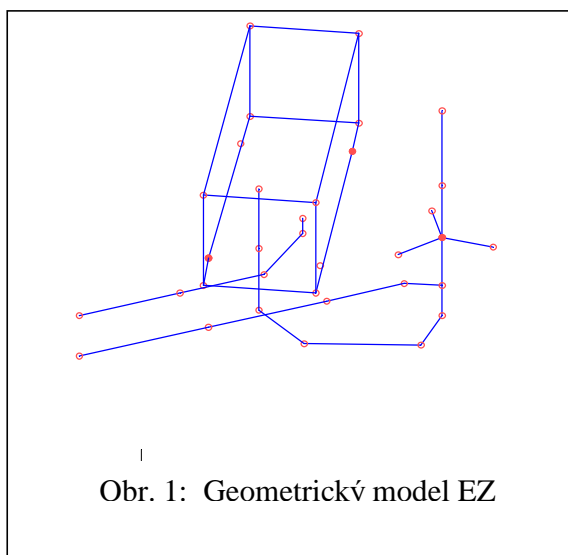
Významným příspěvkem k ověření uvedené metodiky nepřímé identifikace MIMO systémů byly experimentální práce prováděné na **reálných** dynamických soustavách:

§ na laboratorním experimentálním zařízení (EZ)

§ na konstrukci horního bloku reaktoru typu VVER 1000 (HOB)

Data naměřená během obou experimentů byla použita pro praktickou aplikaci metodiky identifikace.

3.1 Měření základních dynamických vlastností experimentálního zařízení



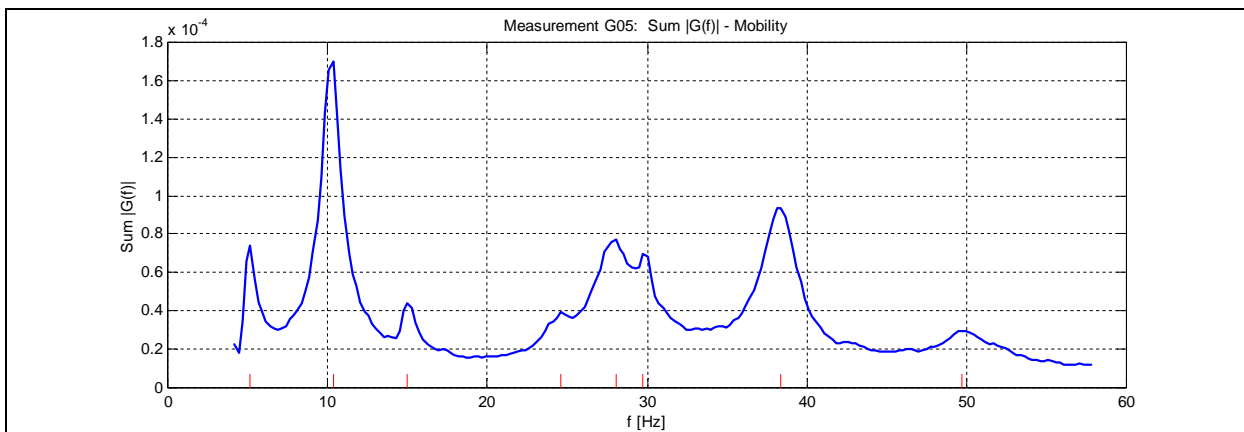
Cílem experimentu bylo získání dat naměřených na reálné konstrukci, na kterých by bylo možné ověřit použití vyvinuté metodiky nepřímé identifikace v modifikaci pro SIMO systémy. Výsledky vyhodnocení touto metodikou byly porovnány s výsledky nezávislého měření a vyhodnocení pomocí komerčně dostupného systému pro experimentální modální analýzu MODAL 3.0.

Na EZ, které tvořil fyzikální model chladicí smyčky reaktoru VVER 1000 v měřítku 1:9 (viz Obr. 1), bylo v jednom, neměnném, místě aplikováno buzení ve tvaru náhodného šumu s efektivní hodnotou $3 N_{\text{RMS}}$. Průběh budicí síly byl měřen pomocí piezoelektrického snímače síly typu

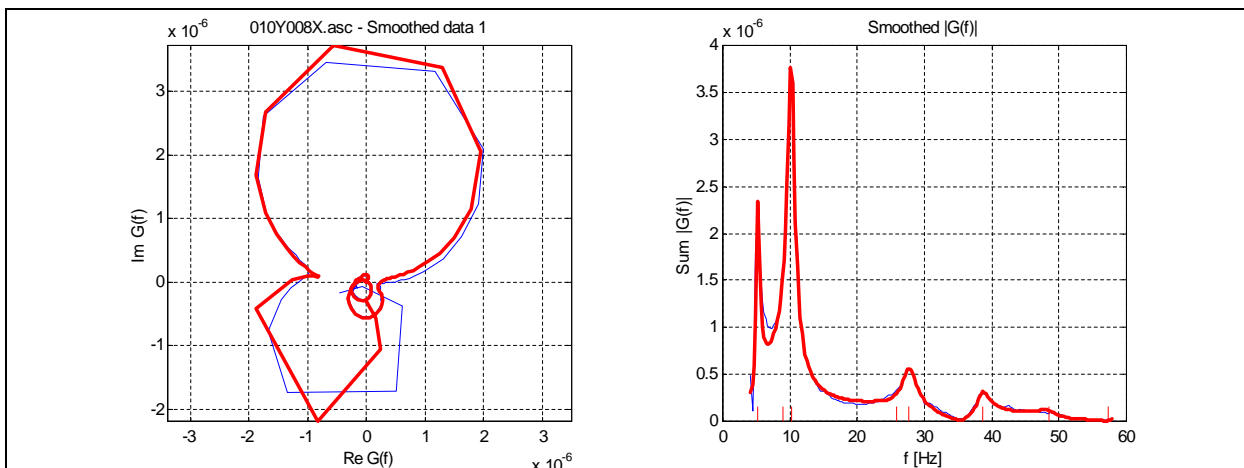
BK 8200. Odezva zrychlení byla měřena postupně ve 23 bodech EZ pomocí tříosého piezoelektrického akcelerometru typu BK 4321.

Měřené signály zrychlení byly pro **experimentální modální analýzu** (EMA) vzorkovány s frekvencí $f_s = 256$ Hz a dále zpracovávány FFT algoritmem ve dvoukanálovém spektrálním analyzátoru BK 2034 s nastaveným frekvenčním rozsahem $0 \div 100$ Hz. Pro daný způsob náhodného buzení bylo vybráno Hannovo časové okno jak pro signál buzení, tak pro signály měřené odezvy. Průměrovaný frekvenční přenos byl v každém bodě určen ze 100 realizací.

Pro vyhodnocení pomocí **metodiky pro systémy SIMO** byly současně měřeny signály odezvy výchylky v šesti místech hlavních komponent EZ. K měření byly použity snímače relativních posuvů typu HBM W10TS ve spojení se zesilovacím induktivním polomostem typu HBM KWS 673. Signály byly vzorkovány s frekvencí $f_s = 512$ Hz a ukládány pomocí specializovaného počítačového 48-kanálového měřicího systému *Analog*, viz práce (Macák & Tanzer, 2002). Frekvenční přenosy byly určeny pomocí vyhodnocovacího systému *Digilog* ze signálu buzení a jednotlivých signálů odezvy výchylky. Výsledná sada 23 frekvenčních přenosů pak tvořila vstupní data pro metodu identifikace, jejíž 4 kroky jsou popsány v odstavci 1.



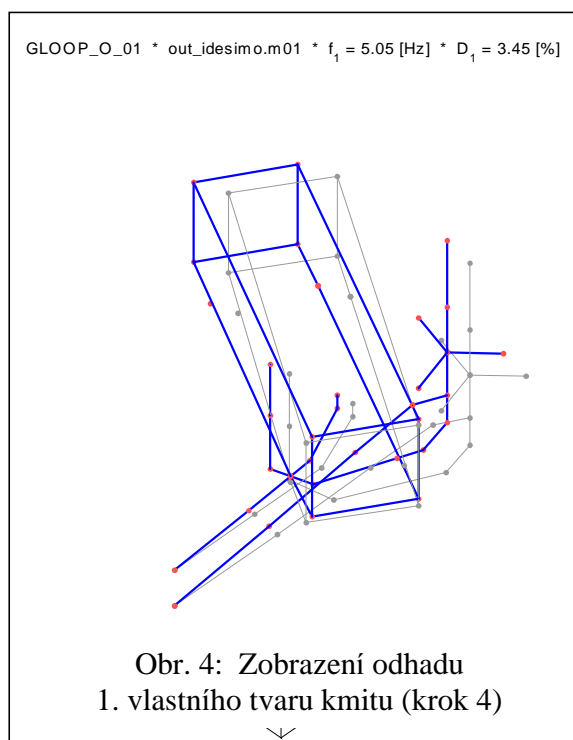
Obr. 2: Součtový frekvenční přenos rychlosti (krok 1)



Obr. 3: Ukázka vyhlazeného frekvenčního přenosu (krok 2)

Tab. 1: Porovnání výsledků použitých metod vyhodnocení pro měření na EZ

3.1.1 EMA			3.1.2 Identifikace SIMO		
f_v [Hz]	D_v [%]	Popis vlastního tvaru	f_v [Hz]	D_v [%]	Popis vlastního tvaru
4,51	1,60	PG a HCČ ve fázi	5,05	3,45	PG a HCČ ve fázi
10,15	1,79	Natáčení PG kolem z	10,10	4,47	Natáčení PG kolem z
14,75	0,55	Pohyb PG a HCČ	14,78	3,40	Pohyb HCČ
27,42	1,87	PG a HV vodorovně	26,87	7,04	Rovinný pohyb PG a HV
38,54	1,15	PG a HCČ v protifázi	38,13	2,37	PG a HCČ v protifázi
49,03	1,90	Natáčení PG podle y i z	49,85	3,20	Rovinný pohyb PG a HCČ



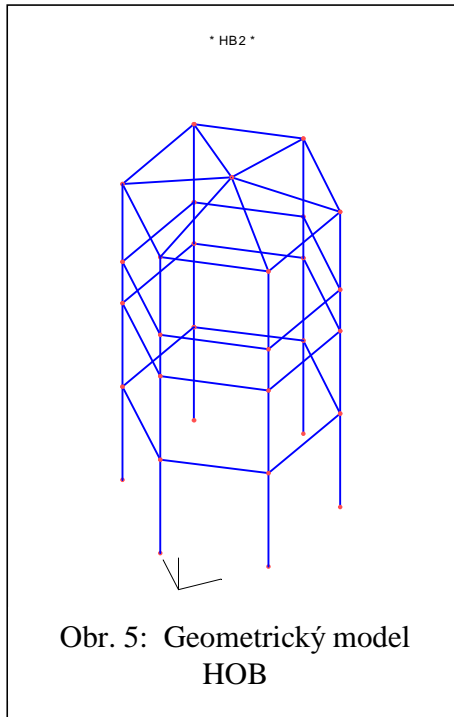
Vlastní frekvence f_n , poměrné útlumy D_n i odhady vlastních tvarů kmitání \mathbf{v}_n získané metodou experimentální modální analýzy a metodou identifikace SIMO systému jsou porovnány v Tab. 1. Z této tabulky je zřejmá velmi dobrá shoda mezi vlastními frekvencemi i mezi odhady vlastních tvarů kmitu, identifikovanými oběma porovnávanými postupy.

3.2 Měření základních dynamických vlastností horního bloku reaktoru VVER 1000

Cílem měření, prováděného na horním bloku (HOB) reaktoru VVER 1000 1. i 2. bloku jaderné elektrárny Temelín (ETE) bylo experimentální stanovení základních dynamických vlastností jeho konstrukce. Těmi se v tomto případě rozumí vyhodnocení vlastních frekvencí, poměrných útlumů a odhadů vlastních tvarů kmitu, ležících ve frekvenčním intervalu 3,0 ÷ 20,0 Hz.

Na 1. bloku ETE byl pro vyhodnocení měření použit komerční systém pro experimentální

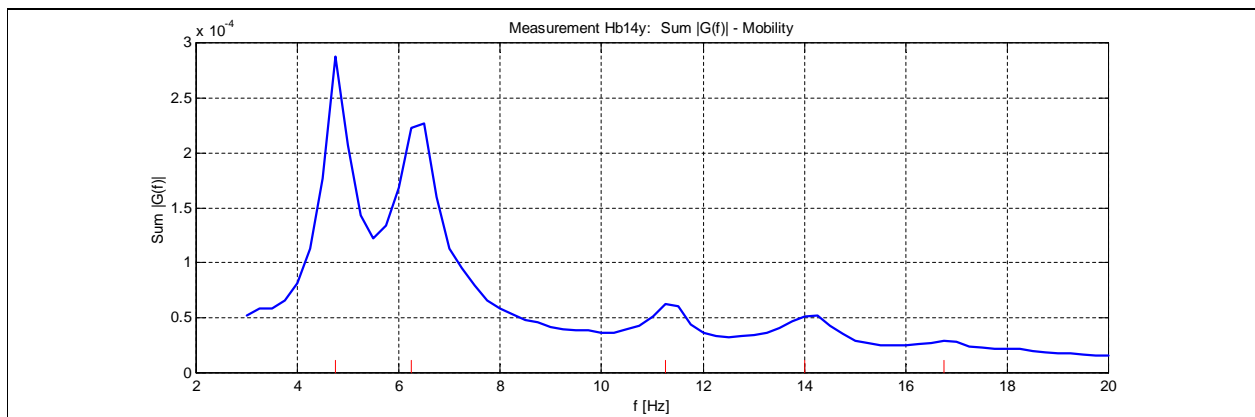
modální analýzu MODAL 3.0. Naproti tomu byla na 2. bloku ETE pro identifikaci využita metodika nepřímé identifikace v modifikaci pro MISO systémy. V tomto případě se sice nejednalo o měření na totožném reálném díle, ale protože šlo o identické konstrukce, byla i tato měření považována za vhodná k ověření uvedené metodiky.



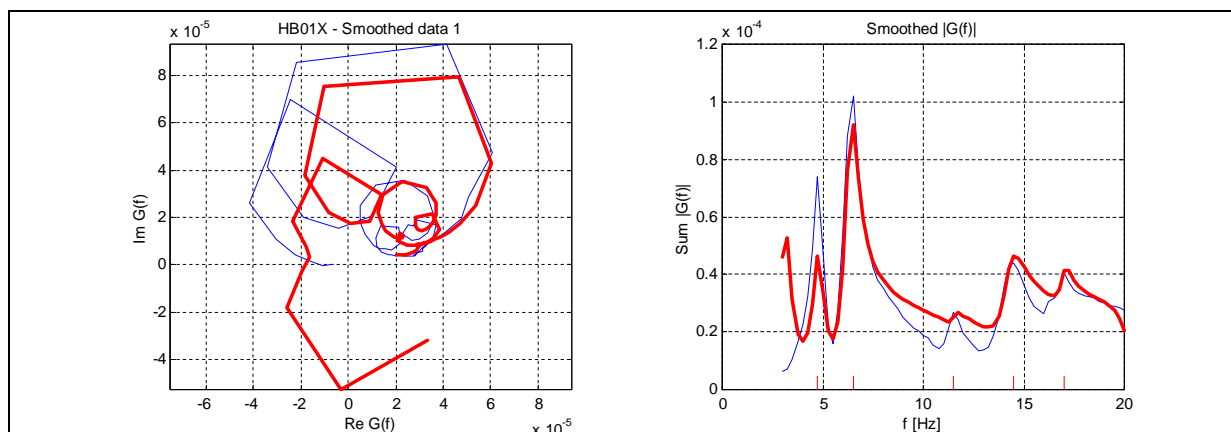
Buzení HOB na 1. i 2. bloku ETE mělo rázový charakter a bylo realizováno pomocí speciálního velkého rázového kladiva. V každém vybraném bodě konstrukce bylo buzeno v tečném i v radiálním směru vzhledem k obvodu konstrukce. Úder v každém bodě a směru (tj. stupni volnosti) byl pětkrát opakován. Odezva vyšetřované konstrukce horního bloku byla měřena pomocí vysoce citlivého akcelerometru typu BK 4370 v jednom, neměnném, referenčním bodě – na horním konci konstrukce HOB v tečném směru.

Měřicí zařízení pro provedení experimentu na obou blocích ETE sestávalo z měřicího řetězce pro buzení, měřicího řetězce pro odezvu a záznamového a vyhodnocovacího zařízení. **Záznamové zařízení** tvořil sedmikanálový měřicí magnetofon TEAC MR 30 s frekvenčně modulovanými kanály. **Vyhodnocovací zařízení** představoval dvoukanálový spektrální analyzátor typu B&K 2034. Během měření sloužil analyzátor ke kontrole nahrávaných signálů, později byl využit pro zpracování zaznamenaných magnetofonových záznamů.

Frekvenční rozsah zpracování záznamů byl $0 \div 100$ Hz, tzn. že záznam byl spektrálním analyzátozem BK 2034 vzorkován frekvencí $f_s = 256$ Hz. Pro měření signálu buzení bylo použito krátké obdélníkové časové okno s délkou nastavenou na 500 ms určené pro sledování přechodových dějů, pro signál odezvy bylo použito exponenciální časové okno o délce 2,4 s. Na vstupy obou signálů do analyzátoru byl aplikován analogový filtr s horní propustí 3 Hz. Pro výpočet průměrovaného frekvenčního přenosu mezi signálem odezvy a signálem buzení bylo pro každý bod a směr buzení využito lineární průměrování z pěti realizací.



Obr. 6: Součtový frekvenční přenos rychlosti (krok 1)



Obr. 7: Vyhlazený frekvenční přenos (krok 2)

Komplexní frekvenční přenosy, vypočtené užitím spektrálního analyzátoru byly vstupními daty pro další nepřímou identifikaci systémů MISO uvedenou metodikou .

Vypočtená globální charakteristika – součtový frekvenční přenos – určená z jednotlivých měřených frekvenčních přenosů a zobrazená ve tvaru rychlosti, je uvedena na Obr. 6. Ukázkou vyhlazeného frekvenčního přenosu představuje Obr. 7.

Aplikace metodiky komplexního vyhodnocení pro systémy MISO v časové oblasti vedla k identifikaci sady vlastních frekvencí, odpovídajících poměrných útlumů a odhadů vlastních tvarů kmitů.

Z měření na horním bloku reaktoru ETE1 bylo vyhodnoceno a identifikováno pět nejnižších vlastních frekvencí ležících v intervalu 5 ÷ 20 Hz a jim odpovídající poměrné útlumy a vlastní tvary kmitů. Velmi blízké frekvence a obdobné tvary kmitu byly identifikovány i z výsledků naměřených na horním bloku reaktoru ETE2. Výsledky shrnuje Tab. 2.

Tab. 2: Porovnání výsledků použitých metod vyhodnocení pro měření na HOB

3.2.1 ETE1 – EMA			3.2.2 ETE2 – MISO		
f_v [Hz]	D_v [%]	Popis vlastního tvaru	f_v [Hz]	D_v [%]	Popis vlastního tvaru
5,07	2,64	1. ohybový tvar	4,82	6,50	1. ohybový tvar
6,70	3,28	1. torzní tvar	6,44	6,64	1. torzní tvar
11,18	2,36	2. ohybový tvar	11,50	4,87	2. ohybový tvar
13,87	1,59	2. torzní tvar	14,27	4,45	2. torzní tvar
17,34	4,49	–	17,15	6,40	–

4. Shrnutí a závěry

S využitím nástrojů MATLAB 5.3 byly vytvořeny moduly pro zpracování měřených signálů metodou nepřímé identifikace MIMO systémů v časové oblasti a pro vyhodnocení a animaci vlastních tvarů kmitání.

Byla provedena **série laboratorních experimentů na fyzikálním modelu** chladicí smyčky reaktoru VVER 1000, která byla vyhodnocena jak ve frekvenční oblasti metodou experimentální modální analýzy využitím komerčního programu, tak i v časové oblasti pomocí metodiky pro identifikaci MIMO systémů. Je zřejmá velmi dobrá shoda mezi vlastními frekvencemi, identifikovanými oběma postupy, i mezi odhady vlastních tvarů kmitu - viz Tab. 1. Uvedená metoda identifikace v časové oblasti je dostatečně rychlá i přesná a je použitelná jak pro měření zatížené běžnými náhodnými chybami, tak i – díky vyhlazení poškozených dat regresní metodu – pro měření, která jsou chybami významně poškozena.

Metodiku i programové moduly pro zpracování, vyhodnocení a animaci lze považovat za **ověřenou a použitelnou**, při splnění potřebných předpokladů, pro identifikaci vlastních frekvencí i pro odhady vlastních tvarů kmitů.

Metodika identifikaci MIMO systémů v časové oblasti byla aplikována na data z **měření na horním bloku reaktoru VVER 1000** na 2. bloku ETE. Měření na identické konstrukci horním bloku reaktoru na 1. bloku ETE bylo vyhodnoceno metodikou identifikace ve frekvenční oblasti metodou experimentální analýzy. Porovnání výsledků vyhodnocení obou měření opět **potvrdilo oprávněnost použití** metodiky identifikace MIMO systémů v časové oblasti i vytvořených programových modulů pro vyhodnocení identifikačních měření na reálných konstrukcích.

Příspěvek vznikl za podpory GA ČR, v rámci řešení grantového projektu číslo 101/00/0345 - "Dynamická analýza a optimalizace uložení komponent a potrubních systémů energetických soustav s vazkými tlumiči".

5. Literatura

Kozánek, J. (1995) Poznámka k problému nejmenších čtverců v identifikaci, *příspěvek na kolokviu Dynamika strojů, ÚT AV ČR*, únor 1995

Balda, M. (1999) Identifikace „MIMO“ systémů z impulzních odezev, *příspěvek na konferenci Výpočtová mechanika '99*, Nečtiny, říjen 1999

Balda, M. & Tanzer, M. (2000) Identification of Large-Scale Structures, *příspěvek na konferenci Výpočtová mechanika 2000*, Nečtiny, říjen 2000

Tanzer, M. (2000) Identifikace dynamických vlastností vybraných částí primárních okruhů jaderných elektráren, *disertační práce na Fakultě aplikovaných věd, ZČU v Plzni*, srpen 2000

Macák, P. & Tanzer, M. (2002) Modelování, měření a identifikace dynamických vlastností komponent primárního okruhu jaderných elektráren, *závěrečná výzkumná zpráva II, grantový projekt GA ČR registrovaný pod číslem 101/00/0345*, Plzeň, prosinec 2002