

COMPARATIVE STUDY OF THE PARAMETRIZATION TECHNIQUES IN VIBRATION BASED DAMAGE DETECTION OF WELDED TEST STRUCTURE

Branislav TITURUS, Ladislav STAREK[•]

Summary: The primary aim of this paper is to compare and evaluate the viability of chosen parameterisation methods in vibration based damage detection via study of these approaches on real welded test structure. Both, the substructure parameters approach and the spring joint model approach are enquired and lessons learned during their application are reported.

1. Úvod

Detekcia poškodenia mechanických sústav (MS) využívajúca experimentálne údaje o dynamických vlastnostiach [1] je snahou o posúdenie stavu poškodenia MS, t.j. lokálnych zmien pomocou veličín globálneho charakteru (vlastné frekvencie (VF), vlastné tvary (VT), atď.). Vychádza sa z predpokladu, že v priebehu vzniku poškodenia sa menia fyzikálne parametre MS a tieto zmeny zas spôsobujú zmenu dynamických vlastností MS.

Veľmi častým kritériom pre rozdelenie metód detekcie poškodenia je existencia, resp. využívanie matematického modelu MS. V tomto prípade je možné metódy detekcie poškodenia rozdeliť do dvoch základných skupín

- metódy vyžívajúce matematické modely MS (označované ako tzv. model based)
- metódy nevyužívajúce matematické modely MS (označované ako tzv. non-model based)

Pri detekcii poškodenia sa navzájom porovnáva skupina údajov popisujúca nepoškodenú MS so skupinou údajov popisujúcich *potenciálne* poškodenú MS. V prípade tzv. *model based* metód je prvá skupina údajov spravidla získavaná pomocou metódy konečných prvkov (MKP) [2]. Experimentálne údaje, t.j. údaje popisujúce skutočný stav MS sú obvykle zaradené do druhej skupiny porovnávaných údajov. Tieto sú často získavané pomocou experimentálnej modálnej analýzy (EMA) [3]. Metódy detekcie poškodenia využívajúce matematický model sa delia na

- parametrické metódy detekcie poškodenia
- neparametrické metódy detekcie poškodenia

Neparametrické metódy [2], [4] detekujú poškodenie na základe priameho porovnávania veličín ako napr. vlastné tvary, matice tuhosti, matice poddajnosti, atď. Parametrické metódy [2], [5] využívajú *vhodne* zvolenú skupinu parametrov na popis MS, resp. potenciálneho poškodenia. Cieľom tejto skupiny metód je umožniť, sledovaním vývoja hodnôt jednotlivých parametrov v priebehu monitorovania MS robenie úsudkov o stave poškodenia MS. Vhodná voľba spôsobu parametrizácie,

Prof. Ing. Ladislav Starek, CSc. (starek@cvt.stuba.sk), Ing. Branislav Titurus (titurus@sjf.stuba.sk) Katedra technickej mechaniky, Strojnícka fakulta STU, Nám.slobody 17, 812 31 Bratislava, Slovenská republika

jednotlivých parametrov a v niektorých prípadoch aj predpoklad istého špecifického druhu poškodenia môžu pozitívne, resp. negatívne ovplyvniť výkonnosť jednotlivých metód detekcie poškodenia. Cieľom tohoto príspevku je vzájomné porovnanie a vyhodnotenie výkonnosti dvoch zvolených parametrizačných prístupov na zváranej konštrukcii pri rôznych úrovniach zvarenia jej častí. Tento príspevok je možné chápať ako počiatočnú štúdiu problému podrobne popísaného v 3. kapitole. Dôraz sa tu predovšetkým kladie na podrobnú analýzu experimentálnych výsledkov a úvodné analýzy použitých 'intuitívnych' prístupov.

2. POUŽITÉ METÓDY PARAMETRIZÁCIE

Parametre subštruktúry (substructure parameters), [2]

V tomto prípade majú jednotlivé parametre (θ_j , j=1,...,l, θ_k , k=1,...,p) nefyzikálny charakter a vyjadrujú mieru vplyvu daného elementu, alebo subštruktúry reprezentovanej pomocou \mathbf{M}_j a \mathbf{K}_j na celkovú, globálnu maticu \mathbf{M} a \mathbf{K} celej MS (\mathbf{M}_0 a \mathbf{K}_0 popisujú počiatočný model, resp. neparametrizovanú časť MS). Jednotlivé parametre sa môžu meniť v rozsahu od 0 po 1

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \sum_{j=1}^{l} \boldsymbol{\theta}_j \mathbf{M}_j \qquad \qquad \mathbf{K} = \mathbf{K}_0 + \sum_{k=1}^{p} \boldsymbol{\theta}_k \mathbf{K}_k \qquad (1a, b)$$

Vzhľadom na uvedenú formuláciu je možné zvoliť dve nezávislé skupiny parametrov pre výpočet, prípadne predpokladať, že poškodenie ovplyvňuje len tuhosť, resp. hmotnosť MS. Rovnako existujú dve možnosti pre počiatočnú voľbu parametrov a to 1, alebo 0.

Parametrický pružinový model väzieb (spring joint model), [6]

Parametrický pružinový model väzieb je ďalším prístupom umožňujúcim parametrizáciu problémov, obzvlášť vhodným pre použitie v prípade zváraných konštrukcií. Jeho charakteristickou črtou je, že dva členy konštrukcie fyzicky spojené pomocou zvarov sú v modeli spojené pomocou nehmotného (kvôli zachovaniu celkovej hmotnosti MS) a dokonale tuhého (resp. 'veľmi' tuhého) nosníkového prvku a ďalej pomocou skupiny translačných a rotačných pružín podľa Obr.1. Nehmotný element je medzi neutrálnou osou jednej časti nosníkovej konštrukcie a bodom pripojenia druhej časti MS, t.j. v mieste zvaru. Vzájomné prepojenie dvoch častí je potom modelované prepojením jednotlivých stupňov voľnosti dvoch koincidentných uzlov pomocou skupiny pružinových elementov (pre prípad rovinného problému je možné použiť k_x , k_y a k_{ω}). Jednotlivé parametre nepoškodenej MS sú identifikované ako prvé a následne sú identifikované parametre popisujúce





potenciálne poškodenú MS. Rozdiel medzi hodnotami parametrov v týchto dvoch skupinách by mal byť ukazovateľom stavu poškodenia jednotlivých spojov v MS.

3. EXPERIMENT

Zvolené parametrizačné prístupy boli vyšetrované na zváranej konštrukcii podľa Obr.2a. Experimentálne údaje boli získané pomocou EMA. Na MS sa nachádzajú 4 miesta v ktorých sú lokalizované kútové zvary. Vzhľadom na náchylnosť tohoto druhu spoja na poškodenie boli uvedené parametrizácie zamerané práve na miesta zvarov. Poškodenie zvarov bolo simulované zámernými, neúplnými zvarmi v miestach 1, 2, 3 a 4 (pozri Obr.2a). Jednotlivé kombinácie zvarov reprezentujúce rôzne stavy a úrovne poškodenia na MS boli simulované postupným zváraním MS až do 'nepoškodeného' stavu, t.j. stavu kompletného zvarenia MS. Jednotlivé stavy zvarenia MS sú popísané v Tab.1. Budenie a rozloženie snímačov zrýchlenia v priebehu experimentu sú uvedené na Obr.2b.

Obr.2b reprezentuje aj matematický model (MKP) meranej sústavy. Táto bola modelovaná pomocou Euler-Bernoulliho nosníkového prvku s troma stupňami voľnosti v každom uzle (celkovo 96 stupňov voľnosti). Prítomnosť snímačov zrýchlenia bola modelovaná použitím 'mass' elementov, Obr. 2b.



Obr.2 Schéma a diskretizácia (EMA, MKP) meranej MS

Na budenie sústavy bolo používané rázové kladivko PCB 086C03. Snímanie výstupného signálu bolo zabezpečené dvoma snímačmi zrýchlenia Brüel & Kjær Typ 4384 (pozri Obr.2b), ktoré boli v danej konfigurácii referenčné. MS bola v priebehu merania diskretizovaná podľa Obr.2b. Meranie bolo realizované v rozsahu od 0 do 625 Hz, pričom dĺžka meraného bloku bola 2¹⁵ vzoriek. Spracovanie analógového signálu bolo realizované meracím systémom HP E1421B s meracou kartou HP E1432A. Merací systém bol riadený pomocou PC, programom v Matlab-e vytvorenom na KTM SjF. Namerané frekvenčné prenosové funkcie (FRF) boli vyhodnotené a modálne údaje boli určené pomocou Structural Dynamics Toolbox v.3.1 [7].

Tab.1 Porovnanie identifikovaných VF zdravej (Stav VII) a 'poškodených' (Stav I až VI) MS,
porovnanie identifikovaných VF (Stav VII) a VF získaných pomocou neparametrizovaného,
počiatočného MKP modelu meranej MS

<i>P.č.</i>	Stav I	Stav II	Stav III	Stav IV	Stav V	Stav VI	Stav VII	MKP
1.	27,63	33,57	34,18	48,60	50,26	60,06	60,57	98,23
-	(-54,38)	(-44,58)	(-43,57)	(-19,76)	(-17,02)	(-0,83)	(0)	(62,18)
2.	118,64	120,94	120,74	125,04	124,82	126,60	126,53	136,51
	(-6,24)	(-4,42)	(-4,57)	(-1,18)	(-1,35)	(0,06)	(0)	(7,89)
3.	126,38	129,92	130,64	138,97	139,63	147,86	147,05	184,06
	(-14,05)	(-11,65)	(-11,16)	(-5,49)	(-5,05)	(0,44)	(0)	(25,17)
4.	169,77	172,28	172,32	174,77	175,42	175,86	175,89	185,13
	(-3,48)	(-2,05)	(-2,03)	(-0,64)	(-0,27)	(-0,02)	(0)	(5,25)
5.	264,77	275,73	275,42	280,09	280,33	280,81	280,76	294,67
	(-5,70)	(-1,79)	(-1,90)	(-0,24)	(-0,15)	(0,01)	(0)	(4,95)
6.	279,64	280,38	280,24	300,44	301,72	319,60	320,56	405,52
	(-12,77)	(-12,54)	(-12,58)	(-6,28)	(-5,88)	(-0,30)	(0)	(26.50)
7.	298,91	312,58	317,15	342,10	347,97	359,55	360,70	509,94
	(-17,13)	(-13,34)	(-12,07)	(-5,16)	(-3,53)	(-0,32)	(0)	(41,37)
8.	393,61	394,14	396,57	411,31	414,17	423,40	424,03	560,85
	(-7,17)	(-7,05)	(-6,47)	(-3,00)	(-2,33)	(-0,15)	(0)	(32,27)
9.	550,55	551,78	552,71	560,06	560,63	565,93	566,52	608,52
	(-2,82)	(-2,60)	(-2,44)	(-1,14)	(-1,04)	(-0,10)	(0)	(7,41)
Popis zvarov pri jednotlivých meraných stavoch.								
	4 3	4 3	4 3	4 3	4 3	4 3	4 3	
	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	
					ļ	ļ		

Pozn.: Jednotlivé VF sú uvedené v [Hz], veličiny uvedené v oblých zátvorkách reprezentujú vzájomné porovnanie medzi *Stavom VII* a *Stavmi I* až *VI*. Tieto veličiny sú uvedené v [%].

V Tab.1 je možné pozorovať nízku citlivosť identifikovaných VF na existujúce rozdiely medzi jednotlivými stavmi. Tento jav je veľmi dobre pozorovateľný na percentuálnych hodnotách rozdielov VF medzi *Stavom VI* a *VII*. Najcitlivejšou na vnášané 'poškodenia' sa javí 1.VF. Toto je predovšetkým spôsobené faktom, že vo VT prináležiacom 1.VF hrajú 'poškodené' zvary primárnu úlohu. Predchádzajúca poznámka však neplatí pre 1.VT (ako je viditeľné z prvého stĺpca Tab.2), keďže charakter, resp. tvar VT sa zachováva pri prechode z jedného stavu k druhému.

Ďalšou zaujímavou črtou porovnaní uvedených v Tab.1 je extrémne veľká nezhoda medzi hodnotami reprezentujúcimi Stav VII a hodnotami získanými pomocou matematického modelu sledovanej MS (62,18 % v prípade 1.VF). Napriek očakávaniu (vzhľadom na lokálne zvýšenie tuhosti kvôli obvodovým kútovým zvarom v miestach 1 až 4, pozri Obr.1a) sa javí experimentálna sústava menej 'tuhá' ako sústava reprezentovaná modelom MKP. Uvedený jav je spôsobený tým, že teoretický predpoklad o zachovaní pravého uhla v mieste zvaru nie je možné aplikovať na situáciu reprezentovanú Obr.1a. Toto bolo potvrdené ako pozorovaniami na sústave len s jedným zvarom, tak aj na detailnom modely meranej sústavy vytvorenom pomocou škrupinových prvkov (5040 stupňov voľnosti). Ukázalo sa, že v mieste zvaru dochádza k lokálnej deformácii použitého tenkostenného profilu a to má za následok dramatické zníženie tuhosti celej MS a teda aj pokles meraných VF. Ďalším faktrom ktorý by mohol ovplyvniť pozorované rozdiely je to, že jednotlivé zvary boli realizované na tenkostenných profiloch s hrúbkou len 2 mm a teda miesta MS v okolí zvarov môžu byť značne ovplyvnené (prevarenie steny, lokálne stenšenie hrúbky steny, atď.) práve týmto druhom technológie spájania materiálu. Dôsledok tohoto na aplikované parametrizačné prístupy spočíva v tom, že bude potrebné najprv stanoviť hodnotu jednotlivých parametrov tak, aby matematický model reprezentoval Stav VII a tieto hodnoty parametrov budú ďalej považované za referenčné.

zoupovedajucim <i>stavu vii</i> s v i zoupovedajucim <i>stavom i</i> az vi									
	1.VT	2.VT	<i>3.VT</i>	4.VT	5.VT	6.VT	7.VT	8.VT	9.VT
Stav VII	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Stav VI	99,7	99,9	99,8	99,7	99,8	99,7	99,9	95,1	98,1
Stav V	96,9	95,8	95,4	99,8	99,2	85,9	81,3	91,1	97,4
Stav IV	96,0	96,2	94,1	99,8	99,5	89,4	87,1	91,8	97,8
Stav III	97,5	89,6	89,6	98,8	33,8	35,6	83,7	88,9	96,8
Stav II	97,5	94,4	95,2	98,6	36,4	39,7	90,0	88,0	97,2
Stav I	97,9	96,4	97,3	97,1	15,7	19,5	97,4	87,9	96,1

Tab.2 Hodnoty MAC koeficientov medzi sebe prináležiacimi VT, porovnanie VT zodpovedajúcim *Stavu VII* s VT zodpovedajúcim *Stavom I* až *VI*

Pozn.: Jednotlivé hodnoty MAC koeficientov sú uvedené v [%]. Nízke hodnoty MAC koeficientov vo farebne označených poliach tabuľky sú dôsledkom toho, že pri prechode zo *Stavu III* do *Stavu IV* nastala zmena charakteru kmitania patričných tvarov (5. a 6. VT) vzhľadom na referenčné tvary pri *Stave VII*.



Obr.3 Posuv 4.VF vplyvom 'poškodenia' (prenos 12+y/12+y)

Tab.2 prezentuje nízku citlivosť VT použitím MAC kritéria (Modal Assurance Criterion), napr. [2]. Nízka citlivosť sledovaných VT ja opäť zrejmá predovšetkým z aplikovania MAC kritéria na údaje reprezentujúce *Stav VII* a *VI*. Obr.3 zachytáva postupný posun 4.VF frekvencie v priebehu zmeny stavov zvarenia jednotlivých miest 1 až 4 (pozri Obr.2a a Tab.1).

4. PARAMETRIZÁCIA

Táto časť príspevku je zameraná na vyhodnotenie účinnosti zvolených parametrizačných prístupov. Všeobecný spôsob použitia týchto techník je uvedený v 2. kapitole. Tieto techniky boli zvolené tak, aby postihli charakteristické črty použitia parametrizácie a bol poskytnutý prehľad problémov vznikajúcich pri parametrizácii v detekcii poškodenia s využitím nameraných dynamických charakteristík MS.

Vzhľadom na aplikovaný druh "poškodenia" (pozri kapitola č.3) sa predpokladá len zmena tuhosti sústavy v priebehu prechodu zo *Stavu I* postupne do *Stavu VII*, zmena hmotnostných vlastností MS vplyvom neúplnosti zvarov sa pokladá za zanedbateľnú. Identifikovanie jednotlivých parametrov je realizované prostredníctvom viazanej minimalizácie zvolenej cieľovej funkcie. Cieľová funkcia je vytvorená len za pomoci VF a jej tvar je nasledovný

$$\min F(p_1, p_2, ..., p_m)$$
 (2)

$$F(p_1, p_2, \dots, p_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{i,EXP} - f_{i,NUM}(p_1, p_2, \dots, p_m)}{f_{i,EXP}}\right)^2}$$
(3)

$$LB_i \le p_i \le UB_i, i = 1, \dots, m$$
(4)

 $f_{i,EXP}$ reprezentuje experimentálne (získané pomocou EMA) VF a $f_{i,NUM}$ označuje analytické VF (získané pomocou matematického modelu a skupiny parametrov p_i), LB_i a UB_i sú dolné a horné hranice povolených hodnôt parametrov p_i . Cieľová funkcia v tvare (3), hoci značne jednoduchá (použité sú iba VF), je zvolená zámerne. Jedným dôvom bolo vytvorenie jednotného optimalizačného prostredia pre porovnanie sledovaných techník parametrizácie, druhým dôvodom bola jednoduchosť a presnosť identifikovania VF pri súčastnom stave meracích technológii. Všetky výpočty boli realizované v prostredí programového balíka MatlabTM.

Parametre subštruktúry (substructure parameters), [2]

Pre parametrizáciu MS je použitý vzťah (1b) pri uvažovaní predpokladu o zmene len tuhostných charakteristík sledovanej MS. Pre jednotlivé parametre platí nasledovné (označenie podľa kapitoly č.2) $\theta_j=0$, $\theta_k \in \langle 0,1 \rangle$, pre k=1,...,32, t.j. parametrizované sú všetky elementové matice tuhosti (pozri Obr.2b), matica \mathbf{K}_0 je nulová, t.j. všetky časti, resp. elementy MS sú parametrizované.



Obr.4 Príklad priebehu hodnôt parametrov počas optimalizácie

Graf na Obr.4 zachytáva priebeh vývoja parametrov modelu MS v priebehu ich identifikácie, tak aby ich hodnoty minimalizovali hodnotu cieľovej funkcie (3). V prípade Obr.4 sa jedná o identifikáciu parametrov charakterizujúcich *Stav V*. Je tu zachytená charakteristická vlastnosť aplikovaného prístupu spoločná pre všetky stavy a použité optimalizačné prostredie. Je ňou extrémne pomalá konvergencia ku minimu (pričom nie je zaručené, že uvedené minimum je globálne na oblasti definovanej povolenými hodnotami parametrov).

<i>P.č.</i>	Stav I	Stav II	Stav III	Stav IV	Stav V	Stav VI	Stav VII
1.	-11,93	-0,40	-0,65	-0,96	-0,78	0,04	0,26
2.	7,40	3,06	3,09	2,40	1,69	1,55	1,64
3.	0,08	1,10	0,71	0,83	0,72	1,21	0,54
4.	6,45	1,08	1,41	0,88	0,83	0,35	0,27
5.	2,83	0,79	1,16	0,46	0,31	0,57	0,42
6.	0,17	0,55	-0,91	0,24	0,20	0,26	0,23
7.	3,94	0,79	0,96	0,70	0,57	0,01	-0,01
8.	8,64	-3,89	-3,36	-1,49	-1,13	-1,81	-1,74
9.	9,32	0,02	0,92	0,67	-0,60	-0,16	-0,01
Počiatočná hodnota CF	2,7661	2,1638	2,1076	1,2874	1,2192	0,9103	0,8986
Konečná hodnota CF (konverg.)	0,2059	0,0535	0,0526	0,0340	0,0260	0,0277	0,0253

Tab.3 Porovnanie VF parametrizovaného a experimentálneho modelu (parametre subštruktúry)

Pozn.: Hodnoty rozdielov medzi nameranými a vypočítanými VF sú uvedené v [%]. Hodnoty cieľovej funkcie (CF) sú bezrozmerné veličiny.

Tab.3 predstavuje vzájomné porovnanie hodnôt VF analytickej (resp. parametrizovanej) a experimentálnej MS. Pre *Stavy II* až *VII* bola dosiahnutá veľmi dobrá zhoda medzi vypočítanými a nameranými VF. Aj napriek takejto zhode *nie je možné* na základe hodnôt jednotlivých parametrov robiť akékoľvek úsudky o mieste a úrovni poškodenia. Jedným dôvodom je nízka citlivosť sledovaných veličín (t.j. VF) na zmeny vnášané do sústavy, no predovšetkým spôsob a množstvo dát použitých pri identifikácii jednotlivých parametrov. Jednotlivé VF parametrizovanej MS po dosiahnutí konvergencie sú 'príliš ďaleko' od hodnôt VF zodpovedajúcim príslušným stavom. Takto identifikované parametre síce veľmi dobre popisujú MS na sledovanom frekvenčnom rozsahu, to však nestačí na určenie stavu poškodenia, keďže hodnoty identifikovaných VF môžu byť už aj vizuálne jednoducho porovnateľné s viacerými stavmi poškodenia v 'okolí' identifikovaných VF.

Parametrický pružinový model väzieb (spring joint model), [6]

V prípade tohoto druhu parametrizácie boli parametrizované iba oblasti v mieste zvarov, t.j. oblasti 1, 2, 3 a 4 podľa Obr.2a. V každom mieste bola použitá trojica pružinových elementov (translačná v smere osi x, translačná v smere osi y a rotačná okolo osi z) na vzájomné prepojenie horizontálnych a vertikálnych častí MS podľa Obr.2b a Obr.1.

V prípade tohoto druhu parmetrizácie boli problémy spojené s pomalou konvergenciou ešte výraznejšie. Tento fakt je spôsobený silne nelineárnou povahou cieľovej funkcie, no predovšetkým extrémne nízkou citlivosťou jednotlivých VF na zmeny vo zvolených parametroch. Uvedený jav je dôsledkom nasledujúceho vzťahu vyjadrujúceho citlivosť VF na zmeny v jednotlivých parametroch

$$\frac{\partial \lambda_j}{\partial p_i} = \mathbf{\Phi}_j^{\mathrm{T}} \left[\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial p_i} - \lambda_j \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial p_i} \right] \mathbf{\Phi}_j$$
(5)

kde λ_j (= ω_j^2) je j-té vlastné číslo, Φ_j je j-tý VT, K a M sú globálne matice tuhosti a hmotnosti. Pre prípad parametrizácie MS podľa Obr.2 a za predpokladu, že vplyvom neúplnosti jednotlivých zvarov sa mení len tuhosť MS platí (pre pružinové elementy)

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}(p_i), \mathbf{M} \neq \mathbf{M}(p_i) \text{ a teda} \qquad \frac{\partial \lambda_j}{\partial p_i} = \mathbf{\Phi}_j^{\mathrm{T}} \begin{vmatrix} 0 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & -1 & \\ & & -1 & 1 & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 0 \end{vmatrix} \mathbf{\Phi}_j \qquad (6)$$

Podľa (6) sú výsledkom veľmi nízke citlivosti. Toto je spôsobené tým, že sa v postate odčítavajú hodnoty VT navzájom topologicky susediace a fyzikálne umiestnené veľmi blízko.

Tab.4 je príkladom predchádzajúcich tvrdení. V tabuľke sú uvedené výsledky porovnania VF parametrizovanej MS s im prináležiacimi experimentálnymi VF pre *Stav VII, Stav V* a *Stav III.* Výsleky pre ostatné stavy majú analogický charakter. Z tabuľky je zrejmá neefektívnosť použitej kombinácie cieľovej funkcie a druhu parametrov snažiacich sa postihnúť existujúce rozdiely medzi jednotlivými stavmi.

Pozn.: Jednotlivé hodnoty porovnaní v Tab.4 sú uvedené v [%]. Hodnoty cieľovej funkcie sú bezrozmerné veličiny.

Tab.4 Porovnanie VF parametrizovaného a
experimentálneho modelu
(

п

(pruzinovy model vazled)							
<i>P.č.</i>	Stav V	Stav VI	Stav VII				
1.	4,79	1,46	1,36				
2.	-3,66	-1,96	-2,13				
3.	0,09	0,86	0,03				
4.	-4,03	-3,65	-3,66				
5.	-2,00	-2,98	-3,01				
6.	-7,59	-1,81	-1,87				
7.	-4,60	-1,47	-1,59				
8.	-12,86	-10,57	-10,49				
9.	-7,18	-5,95	-5,86				
Počiatočná hodnota CF	0,2904	0,1402	0,1371				
Konečná hodnota CF	0,1877	0,1347	0,1360				
Počet iterácií	1000	500	500				

5. ZÁVEREČNÉ POZNÁMKY

V predchádzajúcej kapitole boli použité dva spôsoby parametrizácie v snahe o ich využitie v detekcii poškodenia za pomoci experimentálne zistených dynamických vlastností sledovanej MS. V tejto úvodnej štúdii bolo cieľom overenie a vzájomné porovnanie efektívnosti oboch prístupov v čo najjednoduchšom prostredí v súvislosti s náročnosťou na získanie experimentálnych údajov. Pre tento účel bolo zvolené optimalizačné prostredie popísané vzťahmi (2), (3) a (4).

Ako prvé boli použité tzv. *parametre subštruktúry*. Sústava bola parametrizovaná pomocou 32 parametrov vyjadrujúcich mieru vplyvu každého elementu na celkovú tuhosť MS (resp. globálnu maticu tuhosti). Snahou bolo realizovať detekciu poškodenia pomocou údajov nameraných v rozsahu od 0 do 625 Hz (pozri Tab.1), pre šesť 'poškodených' a jeden 'zdravý' stav. Úloha sa ukázala ako príliš náročná pre uvedenú formuláciu. Prejavilo sa to nasledovnými spôsobmi

- pomalá konvergencia použitých optimalizačných algoritmov (sekvenčné kvadratické programovanie - Sequential Quadratic Programming, SQP), Obr.4
- malá citlivosť meraných údajov na 'poškodenia' podľa Tab.3
- lokálnosť určeného minima

Ako druhý bol použitý prístup využívajúci *parametrický pružinový model väzieb*. Sústava bola parametrizovaná pomocou 12 parametrov (8 translačných a 4 rotačné pružinové elementy). Ostatné

údaje platia rovnako ako v predchádzajúcom odseku. Voľba tohoto druhu parametrizácie bola ovplyvnená intuitívnou predstavou o predpokladom type poškodenia (t.j. poškodenie v mieste zváraných spojov). Pozorovania pri tomto druhu poškodenia sú nasledovné

- pomalá konvergencia k extrému
- nízka citlivosť meraných VF na poškodenie
- lokálnosť určeného minima

Neúspech oboch parametrizácii je teda dôsledkom kombinácie hore spomenutých nedostatkov. Nasledujúcim krokom by malo byť použitie aj VT v procese detekcie poškodenia, preformulovanie cieľovej funkcie pre efektívnejšie identifikovanie sledovaných parametrov a prípadné použitie niektorej z metód globálnej optimalizácie (genetic algorithm, simulated annealing, atď).

6. ZÁVER

Predložený príspevok sa zaoberá problematikou detekcie poškodenia pomocou experimentálne získaných údajov o dynamických vlastnostiach sledovaných mechanických sústav.

V prvej časti, príspevok prezentuje experiment ktorého cieľom bolo zabezpečiť skutočné experimentálne údaje pre nasledovné analýzy. V priebehu experimentu bola vykonaná rozsiahla štúdia navrhnutej konštrukcie. Celkovo bolo sledovaných 7 rôznych stavov konštrukcie, pričom jednotlivé stavy sa navzájom líšili mierou zvarenia miest pripojenia častí konštrukcie. Pri prvotnom porovnávaní identifikovaných a analytických dynamických vlastností zodpovedajúcich nepoškodenému stavu boli zistené nezanedbateľné rozdiely medzi týmito skupinami údajov. Ako sa neskôr ukázalo, táto nezhoda súvisí predovšetkým s druhom materiálu (tenkostenný profil) použitého na výrobu konštrukcie, ako aj s druhom spojov (zvarové spoje) slúžiacich na spojenie jednotlivých častí konštrukcie.

Druhá časť príspevku sa zaoberá úvodnou analýzou zvolených parametrizačných prístupov pri detekcii poškodenia. V oboch zvolených prípadoch bola detekcia poškodenia formulovaná ako viazaná optimalizačná úloha. Cieľom bolo overenie a porovnanie týchto parametrizácii v čo najjednoduchšom prostredí, s ohľadom na súčastný stav meracích technológií. Pre tento účel bola zvolená veľmi jednoduchá cieľová funkcia, vytvorená len pomocou identifikovaných vlastných frekvencií meranej sústavy pre každý sledovaný stav. Ako nasvedčujú pozorovania, použitie takéhoto prístupu je spojené s viacerými problémami z ktorých najakútnejšie sú pomalá konvergencia použitých algoritmov, nedostatočná 'priestorová' informácia o poškodení (t.j. potreba použitia vlastných tvarov), nezaručenosť globálnosti určeného extrému a nízka citlivosť dynamických vlastností na vznikajúce poškodenie. Špecificky pre zvolené parametrizačné prístupy je to nízka citlivosť určovaných údajov (vlastné frekvencie) na zmeny jednotlivých parametrov.

7. **References**

- [1] Doebling S.W., Farrar Ch.R., Prime M.B.: A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, The Shock and Vibration Digest, 30, No. 2, 1998, pp. 91-105
- [2] Friswell M.I., Mottershead J.E., Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995
- [3] Ewins D.J., Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press, Letchworth, 1984
- [4] Farrar Ch.R., Jauregui D.A., Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I. Experiment, Smart Materials and Structures, No. 7, 1998, 704-719
- [5] Friswell M.I., Mottershead J.E., Ahmadian H., Finite Element Model Updating using Experimental Test Data: Parametrization and Regularization, Transactions of the Royal Society of London, Series A, Special Issue on Experimental Modal Analysis, 359, 2001, 169-186
- [6] Horton B., Gurgenci H., Veidt M., Friswell M.I., Finite Element Model Updating of the Welded Joints in a Tabular H-Frame, in: Proc. 17th Int. Modal Analysis Conference, Orlando, 1999, 1556-1562
- [7] Balmès E., Structural Dynamics Toolbox, Users Guide, Version 3, Sèvres Cedex, 1997