

Forward Damage Detection Method Via Genetic Algorithms

K. Čížmár*, L. Starek*

Summary: *This paper deals with group of damage detection methods, called forward methods. The basic idea of this approach is to create the candidate set of possible damage scenarios, which can include the location and the extent of the damage, i.e. detection on Level 3. The changes in dynamic behavior of the mechanical structure of predicted damage scenario is then compared to the measured modal data and the closest damage case is chosen. Genetic algorithm, as a representative of global stochastic optimization method, is in this paper used as a main tool for vibration based damage detection problem solution. This approach is applied to experimental data obtained from bolted structure measured in various damage states*

1. Úvod

Metódy doprednej detekcie poškodenia spadajú vo všeobecnosti do skupiny postupov ktoré dokážu stanoviť poškodenie na úrovni 1, teda určiť že v mechanickej sústave (MS) sa nachádza poškodenie, resp. na úrovni 2, čiže úrovni lokalizácie miesta poruchy. Samotný proces detekcie je pri tomto prístupe založený na porovnávaní zmien ktoré nastali v hodnotách sledovaných analytických a experimentálnych modálnych parametrov (vlastné frekvencie VF, vlastné tvary VT, atď.) v dôsledku prítomnosti poškodenia v MS, pričom analytické hodnoty sú stanovené na základe vopred určených scenárov poškodenia obsahujúcich indikátor, lokalitu, prípadne aj informáciu o rozsahu eventuálnej poruchy (úroveň 3). Následným porovnaním experimentálnych dát s databázou predpokladaných modelovaných stavov poškodenia (najčastejšie vyjadrených vo forme zmien v hodnotách VF) a nájdením prípadu kedy si analytické a experimentálne dáta najlepšie odpovedajú je detekovaná porucha.

V práci Cawley & Adams (1979) je uvedený príklad aplikácie spomenutého prístupu na detekciu poškodenia vznikajúceho v kompozitných materiáloch pri využití zmien v hodnotách VF ako indikátora rozsahu poškodenia. Lokalizácia poruchy bola zabezpečená vytvorením siete bodov predpokladaných porúch. Príspevok Penny et al. (1993) prezentuje problém detekcie ako úlohu lokalizovania najpravdepodobnejšieho prípadu poškodenia simulovaním vopred uvažovaných prípadov porúch a následným porovnaním hodnôt zmien VF pomocou metódy najmenších štvorcov. Iný prístup bol navrhnutý v príspevku Friswell et. al (1994), kde autor rovnako ako v predchádzajúcom prípade vytvorili akýsi katalóg najpravdepodobnejších scenárov poškodení tvorený zmenami v hodnotách VF. Samotná detekcie potom bola

* Prof. Ing. Ladislav Starek, CSc. (starek@cvt.stuba.sk),
Ing. Kvetoslav Čížmár (cizmar@sjf.stuba.sk),

Katedra technickej mechaniky, Strojnícka fakulta STU, Nám. Slobody17, 812 31 Bratislava, Slovenská republika

založená na použití štatistického prístupu. Rozsiahlejší prehľad výsledkov dosiahnutých v tejto oblasti je prezentovaný v práci Doebling et. al. (1996).

Cieľom tohto príspevku je poukávanie na možnosti dorpednej detekcie pri identifikovaní poškodenia vznikajúceho kombinovaným vplyvom redukcie tuhosti a súčasného znižovania hmotnosti v oblasti skrutkových spojov v MS, so snahou o detekovanie poškodenia na úrovni 3 (indikácia, lokalizácia a kvantifikácia poruchy). Proces detekcie je založený na vytvorení databázy možných scenárov poškodení, pričom orientačné hodnoty pre zostavenie takejto databázy sú získané na základe experimentálnej modálnej analýzy typu spoja ekvivalentného k spoju v monitorovanej MS. Samotný proces detekcie pozostáva z korekcie základného matematického modelu sledovanej MS obsahujúcej skrutkové spoje, ako aj korekcie modelu MS ekvivalentného typu skrutkového spoja pre jednotlivé stavy poškodenia a následného výberu z vhodne zostavenej množiny predpokladaných prípadov porúch. Pri riešení tejto úlohy bol použitý genetický algoritmus ako jeden z najrozšírejších predstaviteľov optimalizačných evolučných stratégií.

2. Popis genetického algoritmu

Genetický algoritmus (GA) vychádzajúci z Darwinovej teórie prirodzeného vývoja patrí medzi základné stochastické optimalizačné techniky vyznačujúce sa výraznými evolučnými črtami. S ohľadom na dôraz ktorý bol pri vývoji GA kladený ako na jeho robustnosť tak aj na vyváženosť medzi efektívnosťou a efektívnosťou riešenia si GA našiel uplatnenie v mnohých vedných odboroch. Samotná podstata GA vychádza z vytvorenia počiatkovej populácie chromozómov (binárne kódované optimalizované parametre), ktorá prechádza postupným vývojom cez jednotlivé generácie (*kódovanie, ohodnocovanie, výber, kríženie, mutácia*) pričom výsledkom je nová populácia "lepších" chromozómov ktorá presnejšie vystihuje definovanú úlohu Goldberg (1989), Kvasnička et. al. (2000).

Kódovanie predstavuje proces pri ktorom dochádza k prevodu reálnej hodnoty optimalizovaného parametra x do tvaru binárneho vektora \mathbf{a} dĺžky k . Takto definovanému binárnemu vektoru potom podľa vzťahu (1) Kvasnička et. al. (2000) prináleží reálne číslo z intervalu $[a, b]$.

$$x \approx \text{real}(\mathbf{a}) = a + \left(\frac{b-a}{2^k - 1} \right) \text{int}(\mathbf{a}) \quad (1)$$

Rovnica (1) vyjadruje aproximáciu daného reálneho čísla $\text{real}(\mathbf{a})$ požadovanej hodnoty parametra x s presnosťou $(a-b)/(2^k-1)$. Napríklad v prípade zmeny hodnoty kódovaného parametra x v rozsahu $[0-100\%]$ bude pri reprezentácii pomocou desiatich bitov dosiahnutá maximálna presnosť, resp. rozlíšenie s hodnotou $100\%/1023 = 0.0978\%$.

Ohodnocovanie definuje priradzovanie hodnoty *fitness* jednotlivým členom populácie, pričom *fitness* (hodnota *fitness*) je definovaný ako kladné číslo určujúce schopnosti prežitia a reprodukcie príslušného člena populácie v danom prostredí. Spomínaná *fitness* funkcia sa stanovuje len na základe vhodne definovanej cieľovej funkcie, teda pre riešenie samotného GA nieje okrem cieľovej funkcie potrebná žiadna iná dodatočná informácia.

Výber je proces v ktorom sa z aktuálnej populácie na základe stanovených hodnôt *fitness* vytvorí nová populácia *potomkov*, ktoré budú tvoriť nasledujúcu generáciu. Samotný výber *rodičovských chromozómov* predstavuje kvázínáhodný proces riadiaci sa len mierou *fitness* jednotlivých členov populácie.

Krížene predstavuje operáciu pri ktorej si rodičovské chromozómy s pravdepodobnosťou vyjadrenou operátorom kríženia P_c na základe určitých pravidiel navzájom vymieňajú časti svojich reťazcov (binárne reťazce), pričom sa informácie obsiahnuté v rodičovských chromozómoch prenášajú na potomkov a tým vytvárajú populáciu nových chromozómov.

Mutácia je definovaná ako náhodná operácia s nízkou pravdepodobnosťou, pri ktorej dochádza k určitej modifikácii informácie nesenej populáciou potomkov (populácie chromozómov získaných po ukončení procesu kríženia). Náhodnosť tejto operácie je vyjadrená operátorom pravdepodobnosti mutácie P_m .

Efektívnosť takto popísaného jednoduchého GA je možné ďalej zvyšovať rôznymi modifikáciami už definovaných operátorov, respektíve zavedením nových operátorov do štruktúry GA. Napríklad aplikovaním elitizmu Goldberf (1989), tzv. *messy* chromozómov Kvasnička et. al. (2000), alebo zavedením vekovo štruktúrovaného GA.

3. Cieľové funkcie

Detekcia poškodenia predstavuje problém pri ktorom hľadáme také hodnoty parametrov monitorovanej MS, ktoré minimalizujú zvolené cieľové funkcie (CF). Na základe analytických a experimentálnych dát môžeme CF definovať napríklad pomocou zmien v hodnotách VF , VT , alebo ich vhodnou vzájomnou kombináciou.

CF využívajúca zmeny v hodnotách VF môže byť definovaná napríklad nasledujúcim vzťahom Friswell et. al (1998)

$$J_f(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_{ai}^2(\mathbf{a}) - \lambda_{ei}^2}{\lambda_{ai}^2(\mathbf{a}) + \lambda_{ei}^2} \right)^2 w_i \quad (2)$$

kde n predstavuje počet použitých vlastných čísel (VČ), $\lambda_{ai}(\mathbf{a})$ a λ_{ei} predstavujú vektory analytických a experimentálnych VČ danej MS a w_i je váhový koeficient porovnávaných VČ. Výhodou tejto CF je skutočnosť že koeficienty zmien jednotlivých VČ sa pohybujú v intervale hodnôt $[0, 1]$ čo poskytuje určitý prehľad o priebehu riešenia. Pri detekcii poškodenia však môže nastať situácia, že zmeny v experimentálnych hodnotách VČ vyvolané prítomnosťou poškodenia sú menšie ako rozdiely medzi základným experimentálnym a korigovaným, alebo nekorigovaným matematickým modelom. V takom prípade je vhodnejšie použiť namiesto VČ hodnoty určujúce zmenu VČ pre experiment a matematický model, pričom ich môžeme stanoviť napríklad ako rozdiel, podiel, prípadne ako percentuálnu zmenu hodnoty VČ v jednotlivých stavoch poškodenia.

Kombináciou hodnôt zmien VF a VT môžeme CF písať napríklad v nasledujúcom tvare Yap & Zimmerman (1998)

$$J_f(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \frac{|\lambda_{ai}(\mathbf{a}) - \lambda_{ei}|}{\lambda_{ai}} w_{fi} \cdot r + \left\| (\mathbf{V}_a(\mathbf{a}) - \mathbf{V}_e) \mathbf{W}_t \right\|_f (1-r) \quad (3)$$

kde n predstavuje počet VČ a im prislúchajúcich VT použitých pri detekcii poškodenia, $\lambda_a(\mathbf{a})$, λ_e a $\mathbf{V}_a(\mathbf{a})$, \mathbf{V}_e predstavujú analytické a experimentálne VČ resp. VT, w_{fi} predstavujú váhové koeficienty porovnávaných VČ, \mathbf{W}_t je definovaná ako diagonálna matica váhových koeficientov porovnávaných VT a $r \in (0,1)$ definuje tzv. koeficient participácie ktorou sa jednotlivé členy cieľovej funkcie podieľajú na jej výslednej hodnote. Takáto formulácia CF je

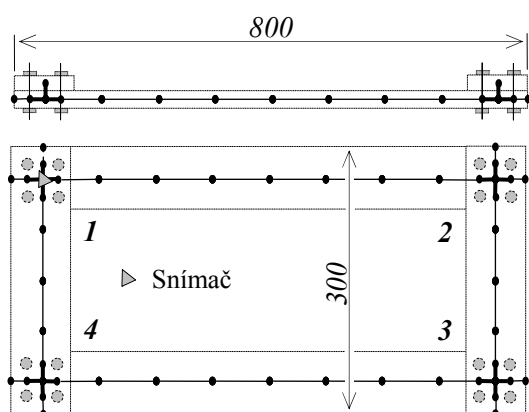
vhodná pre proces korekcie matematického modelu, alebo v prípade detekcie pri identifikácii poškodenia v symetrických MS, kedy VT spĺňajú úlohu akejsi okrajovej podmienky pre zamedzenie prípadnej nesprávnej detekcie poškodenia v dôsledku symetrie monitorovanej MS. Pri detekcii poškodenia je rovnako ako v rovnici (2) možné nahradiť VČ hodnotami rozdielov medzi VČ nameranými na zdravej a poškodenej MS.

Lokalizácia poškodenia v prípade uvedených tvarov CF potom spočíva v nájdení takého vektora vybraných parametrov α ktorý minimalizuje hodnotu zvolenej cieľovej funkcie. V prípade tohto príspevku je problém korekcie matematického modelu a detekcie poškodenia obmedzený len na zmeny v hodnotách VČ. VT sú použité len z dôvodu zabezpečenia aby boli porovnávané navzájom si odpovedajúce analytické a experimentálne VČ.

4. Experimentálny príklad

4.1. Experimentálna sústava

V Obr.1 je znázornená meraná MS spolu s jej matematickou (MKP) diskretizáciou. V Tab. 1 sú uvedené hodnoty VF základného a korigovaného MKP modelu, spolu s experimentálnymi VF konštrukcie získanými prostredníctvom experimentálnej modálnej analýzy (EMA), ktoré v Tab. 2 odpovedajú *Stavu 1*. Keďže rozdiel medzi počiatočným MKP modelom a experimentálnymi hodnotami VF je výrazný (Tab. 1) bola vykonaná korekcia matematického modelu, pri ktorej bolo použitých prvých 9 ohybových VF a cieľová funkcia uvedená vo vzťahu (3). Pri korekcii boli lokálne miesta spojov parametrizované pomocou geometrických parametrov a celý model MS parametrizovaný globálnymi parametrami ohybovej a torznej tuhosti. Podrobnejší popis geometrických parametrov, ako aj samotného procesu korekcie a parametrizácie je uvedený v článku Čižmár & Starek (2003). Ako je možné vidieť v Tab. 1 došlo v dôsledku korekcie až na prú VF k výraznému zlepšeniu všetkých sledovaných hodnôt VF. Z pohľadu korekcie matematického modelu je veľmi dobrým znakom skutočnosť, že k vylepšeniu došlo aj v hodnotách VF ktoré neboli pri korekcii použité, čo nasvedčuje ako vhodnej voľbe parametrov tak aj vystihnútiu fyzikálnej podstaty korigovanej MS. Rovnako došlo aj k vylepšeniu hodnôt MAC kritéria, ktoré s ohľadom na obmedzený priestor tu nie sú uvedené



Obr.1 Schéma meranej mechanickej sústavy a jej MKP diskretizácia

Tab.1 Výsledky korekcie matematického modelu

	f_{MKP}	$f_{korigované}$	$f_{merané}$	$\frac{(f_{MKP}-f_{me})}{f_{me}}*100$	$\frac{(f_{kor}-f_{me})}{f_{me}}*100$
1.	35,88	35,70	35,91	-0,17	-0,66
2.	40,30	41,55	41,54	-2,88	0,21
3.	73,11	67,36	67,54	7,89	0,03
4.	110,60	109,67	109,94	0,58	-0,25
5.	153,71	157,10	158,60	-3,07	0,84
6.	214,00	206,96	203,16	4,72	1,48
7.	290,40	280,44	280,75	3,39	0,05
8.	304,59	286,23	285,04	6,55	-0,56
9.	340,76	293,60	294,68	13,55	-0,34
10.	440,49	427,50	416,58	5,54	2,67
11.	449,10	457,19	456,57	-1,58	0,22

Experimentálne hodnoty VF získané prostredníctvom experimentálnej modálnej analýzy (EMA) pre zdravú MS, *Stav 1* a jednotlivé úrovne poškodenia, *Stav 2-10* sú uvedené v Tab.2. Podrobný popis meranej MS a realizovanej EMA je uvedený v literatúre Titurus et. al. (2001).

Tab. 2 Porovnanie nameraných VF zdravej (*Stav 1*) a poškodenej (*Stav 2 - 10*) MS

P.č	Stav 1	Stav 2	Stav 3	Stav 4	Stav 5	Stav 6	Stav 7	Stav 8	Stav 9	Stav 10
1.	35,91 (0)	35,91 (-0,012)	35,94 (-0,099)	35,94 (-0,09)	35,98 (-0,184)	35,98 (-0,194)	36,03 (-0,329)	36,08 (-0,472)	36,11 (-0,573)	36,15 (-0,671)
2.	41,54 (0)	41,37 (0,407)	41,44 (0,244)	41,26 (0,674)	41,35 (0,457)	41,02 (1,239)	41,09 (1,092)	41,06 (1,170)	41,03 (1,224)	40,93 (1,476)
3.	67,54 (0)	67,26 (0,408)	67,36 (0,269)	66,68 (1,265)	66,80 (1,088)	66,38 (1,719)	66,48 (1,560)	66,19 (1,855)	66,23 (1,941)	65,74 (2,663)
4.	109,94 (0)	109,93 (0,009)	109,95 (-0,008)	109,93 (0,003)	109,95 (-0,01)	109,94 (-0,004)	110,02 (-0,076)	110,07 (-0,122)	110,10 (-0,145)	110,10 (-0,146)
5.	158,60 (0)	158,29 (0,196)	158,42 (0,110)	157,30 (0,819)	157,49 (0,700)	156,75 (1,166)	156,98 (1,023)	156,78 (1,144)	156,77 (1,153)	156,00 (1,637)
6.	204,16 (0)	203,71 (0,219)	203,68 (0,232)	202,87 (0,627)	203,01 (0,559)	202,23 (0,942)	201,99 (1,058)	201,88 (1,111)	201,79 (1,155)	201,94 (1,086)
7.	280,75 (0)	280,42 (0,120)	280,49 (0,0922)	278,99 (0,627)	279,40 (0,479)	278,95 (0,642)	279,05 (0,606)	278,57 (0,775)	278,52 (0,793)	278,33 (0,860)
8.	285,04 (0)	284,39 (0,226)	284,49 (0,190)	283,16 (0,658)	283,44 (0,559)	282,27 (0,970)	282,66 (0,833)	282,24 (0,980)	281,98 (1,073)	280,82 (1,478)
9.	294,68 (0)	294,48 (0,066)	294,62 (0,020)	294,35 (0,112)	295,10 (-0,144)	294,52 (0,051)	294,79 (-0,039)	294,71 (-0,011)	294,74 (-0,019)	295,30 (-0,212)
10.	416,58 (0)	415,76 (0,197)	415,85 (0,174)	415,34 (0,297)	415,61 (0,233)	415,34 (0,296)	41603 (0,130)	416,01 (0,135)	416,07 (0,121)	415,82 (0,182)
11.	456,58 (0)	455,91 (0,145)	456,00 (0,126)	454,52 (0,449)	454,64 (0,422)	453,38 (0,699)	453,76 (0,616)	456,32 (0,713)	453,06 (0,758)	451,99 (1,003)

Grafické zobrazenie jednotlivých stavov poškodenia

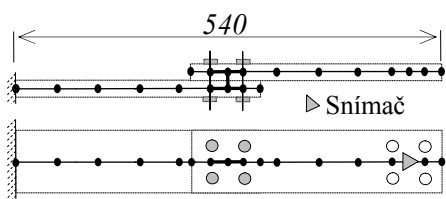
Pozn.: Hodnoty VF v tabuľke sú uvedené v [Hz], čísla v oblých zátvorkách predstavujú rozdiel medzi VF v *Stave 1* a zostávajúcimi *Stavmi 2-10* v [%]. Čísla v riadku popisujúcom grafické zobrazenie priebehu poškodenia predstavujú jednotlivé miesta spojov (pozri Obr. 1) kde ○ predstavuje nepoškodený stav, ● uvoľnenú skrutku a ● odobratú skrutku.

Hodnoty v Tab. 2 prináležiace *Stavom 2-10* odpovedajú jednotlivým simulovaným polohám poškodenia, pričom v dolnej časti tabuľky je uvedené ich grafické znázornenie. *Stavy (2, 4, 6)* predstavujú poškodenie spôsobené uvoľnenou skrutkou a *Stavy (3, 5, 7, 8, 9, 10)* zase poškodenie vyvolané stratou skrutky (pre presné lokalizovanie polohy jednotlivých typov poškodení pozri popis k Tab. 2). *Stavy (1, ... 7)* predstavujú poruchu v jednom mieste MS, konkrétne v uzle č.3 (pozri Obr. 1) a *Stavy (8, 9, 10)* predstavujú tzv. *viacstavové poškodenie* (pozri grafické zobrazenie stavov poškodení v Tab. 2).

4.2 Ekvivalentný typ spoja

Ako bolo napísané v úvode použitá metóda doprednej detekcie poškodenia je založená na vytvorení databázy predpokladaných poškodení sledovanej (cieľovej) MS, pričom dáta použité pri vytvorení samotnej databázy sú získané prostredníctvom experimentálnej modálnej analýzy jednoduchšej (referenčnej) MS obsahujúcej spoj rovnakého charakteru ako sústava cieľová. S ohľadom na povahu cieľovej rámovej konštrukcie (Obr. 1) bol ako referenčná MS zvolený jednoduchý votknutý nosník obsahujúci ekvivalentný typ skrutkového spoja (Obr. 2).

Tab.3 obsahuje hodnoty VF základného a korigovaného MKP modelu, ako aj experimentálne VF odpovedajúce neporušenému stavu skrutkového spoja (*Stav 1* v Tab. 4). Rovnako ako pri cieľovej MS aj v tomto prípade bola s ohľadom na nepresnosť počiatočného matematického modelu vykonaná jeho korekcia, pri použití všetkých štyroch VF uvedených v Tab. 3 a cieľovej funkcie zo vzťahu (3). Parametre korekcie boli volené tak aby boli ďalej použiteľné aj pri následnej korekcii modelu pre jednotlivé stavy poškodenia. Miesto votknutia bolo parametrizované prostredníctvom geometrického parametra a oblasť skrutkového spoja pomocou subštruktúrneho parametra (silno vyznačená oblasť spoja v Obr. 2) popisujúceho zmenu tuhosti a parametra sústredenej hmoty zachytávajúceho zmenu hmotnosti v mieste spoja. Parameter sústredenej hmoty ako aj konfigurácia MKP modelu referenčnej MS vyplýval z MKP modelu cieľovej MS, kde bol element spájajúci modelované tyče považovaný za nehmotný.



Obr.2 Schéma meranej referenčnej MS a jej MKP diskretizácia

Tab.3 Výsledky korekcie matematického modelu

	f_{MKP}	$f_{korigované}$	$f_{merané}$	$\frac{(f_{MKP}-f_{me})}{f_{me}}*100$	$\frac{(f_{kor}-f_{me})}{f_{me}}*100$
1.	16,72	16,20	16,25	2,85	-0,365
2.	98,30	98,54	98,55	-0,25	-0,005
3.	297,03	286,44	285,42	4,06	0,355
4.	549,49	550,83	550,56	-0,19	0,047

V Tab. 4 sú uvedené hodnoty VF získaných prostredníctvom EMA pre nepoškodený *Stav 1* a jednotlivé úrovne simulovaného poškodenia *Stav 2-7*, ktoré sú graficky znázornené v dolnej časti tabuľky. *Stavy 2, 4, 6* predstavujú poruchu od uvoľnenia skrutky (zmena tuhosti) a *Stavy 3, 5, 7* od straty skrutky (zmena hmotnosti). V Tab. 4 je tak isto možné názorne vidieť aj príklad situácie ktorá môže nastať pri poškodení ktoré ovplyvňuje ako tuhostné tak hmotnostné vlastnosti MS, konkrétne hodnoty VF odpovedajúce *Stavu 4* a *Stavu 7* sú veľmi podobné.

Tab. 4 Porovnanie nameraných VF zdravej (*Stav 1*) a poškodenej (*Stav 2 - 7*) MS ekvivalentného modelu

	Stav 1	Stav 2	Stav 3	Stav 4	Stav 5	Stav 6	Stav 7
1.	16,25 (0)	16,23 (0,114)	16,26 (-0,058)	16,15 (0,624)	16,17 (0,479)	16,15 (0,608)	16,18 (0,423)
2.	98,55 (0)	97,65 (0,913)	98,52 (0,029)	95,28 (3,315)	95,97 (2,616)	95,15 (3,445)	95,84 (2,747)
3.	285,42 (0)	285,36 (0,023)	285,68 (-0,089)	285,26 (0,057)	285,58 (-0,054)	285,45 (-0,010)	285,44 (-0,006)
4.	550,56 (0)	545,07 (0,998)	547,93 (0,478)	530,04 (3,727)	532,70 (3,244)	527,34 (4,217)	530,37 (3,667)
<i>Grafické zobrazenie jednotlivých stavov poškodenia</i>							
	① ②	① ②	① ②	① ②	① ②	① ②	① ②
	④ ③	④ ③	④ ③	④ ③	④ ③	④ ③	④ ③

Pozn.: Hodnoty VF v tabuľke sú uvedené v [Hz], čísla v oblých zátvorkách predstavujú rozdiel medzi VF v *Stave 1* a zostávajúcimi *Stavmi 2-7* v [%]. Čísla v poslednom riadku predstavujú polohu skrutky podľa Obr. 2 s daným typom poškodenia kde ○ predstavuje nepoškodený stav, ● uvoľnenú skrutku a ● odobratú skrutku.

Výsledky korekcie matematického modelu pre jednotlivé stavy poškodenia simulovaného v referenčnej MS sú uvedené v Tab. 5. Kvôli jednoduchosti aplikovania výsledkov na cieľovú mechanickú sústavu boli zvolené len dva parametre použité aj pri korekcii základného modelu referenčnej MS. Konkrétne subštruktúrny parameter tuhosti miesta skrutkového spoja

a parameter sústredenej hmoty. Ako je možné vidieť hodnoty VF korigovaného modelu sa od experimentálnych VF nelíšia v prevážnej väčšine prípadov o viac ako 0,5% čo nasvedčuje správnosti zvolenej parametrizácie. V dolnej časti tabuľky sú uvedené konkrétne hodnoty korigovaných parametrov.

Tab. 5 Porovnanie korigovaných analytických a experimentálnych VF odpovedajúcich jednotlivým stavom poškodenia

	Stav 1	Stav 2	Stav 3	Stav 4	Stav 5	Stav 6	Stav 7
1.	16,20 (-0,365)	16,17 (-0,422)	16,19 (-0,470)	16,09 (-0,390)	16,11 (-0,392)	16,08 (-0,488)	16,10 (-0,543)
2.	98,54 (-0,005)	97,71 (0,065)	98,20 (-0,329)	95,45 (0,180)	95,95 (-0,018)	95,14 (-0,014)	95,65 (-0,202)
3.	286,44 (0,355)	286,40 (0,364)	286,42 (0,259)	286,29 (0,361)	286,32 (0,258)	286,28 (0,288)	286,30 (0,301)
4.	550,83 (0,047)	545,33 (0,048)	547,29 (-0,116)	530,32 (0,051)	532,48 (0,043)	527,77 (0,088)	530,03 (-0,066)
<i>Hodnoty korigovaných parametrov</i>							
m [kg]	0,0249 (0)	0,0249 (0)	0,0187 (25)	0,0187 (25)	0,0124 (50)	0,0124 (50)	0,006 (75)
α [-]	3,793 (0)	2,179 (42,48)	2,179 (42,48)	0,868 (77,04)	0,868 (77,04)	0,729 (80,73)	0,729 (80,73)

Pozn.: Hodnoty korigovaných VF v tabuľke sú uvedené v [Hz], čísla v zátvorkách predstavujú rozdiel medzi experimentálnymi a korigovanými VF v [%]. V posledných dvoch riadkoch sú uvedené hodnoty korigovaných parametrov pre jednotlivé stavy poškodenia a čísla v zátvorkách predstavujú rozdiely medzi parametrami v *Stave 1* a *Stavoch (2 - 7)* v [%].

4.3 Detekcia poškodenia

Hodnoty parametrov uvedené v Tab. 5, získané prostredníctvom korekcie referenčného modelu pre jednotlivé stavy poškodenia, sú následne použité ako orientačné hodnoty pre vytvorenie databázy predpokladaných porúch. Miera do akej sú hodnoty korigovaných parametrov iba orientačné závisí od toho, ako presne vystihuje referenčná MS, resp v nej realizovaný spoj charakter spoja v cieľovej konštrukcii. Tak isto vhodnosť zvolenej parametrizácie a fyzikálny význam samotnej korekcie referenčného modelu výrazne ovplyvňujú použiteľnosť získaných dát. S ohľadom na tieto skutočnosti boli silno zvýraznené oblasti v Obr. 1 a Obr. 2 zvolené ako miesta skrutkového spoja parametrizované pomocou subštruktúrneho parametra α popisujúceho poškodenie od uvoľnenia skrutky. Poškodenie od straty skrutky bolo v modeli cieľovej MS definované analogicky ako v prípade korekcie referenčného modelu prostredníctvom parametra sústredenej hmotnosti, pričom v prípade cieľovej rámovej konštrukcie bola počiatočná hodnota tohoto parametra zvolená ako štvornásobok hmotnosti jednej skrutky, teda 0,036 kg. V Tab. 6 je zapísaná štruktúra databázy očakávaných typov poškodení. Každý riadok obsahuje informáciu o *indexe modelovaného poškodenia* i_p , odpovedajúcom *stave* experimentálneho poškodenia (Tab. 2), *polohe* poruchy (čísla uzlov cieľovej MS uvedené v Obr. 1, resp. grafickom popise poškodenia v Tab. 2) a príslušnom indexe predpokladaných hodnôt parametra tuhosti α , a hmotnosti m . Konkrétne hodnoty zvolených parametrov sú uvedené vo vzťahu (4a, b).

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0,70 : 50 : 0,45 \\ 0,40 : 50 : 0,20 \\ 0,26 : 50 : 0,12 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m} = [0,036; 0,027; 0,018; 0,009] \quad (4a, b)$$

Keďže hodnoty získaného parametra tuhosti α sú predpokladané len ako orientačné, bol pre jednotlivé stavy poškodenia definovaný interval v ktorom sa tieto môžu pohybovať. Pri stanovení hodnôt vo vzťahu (4a) sme vychádzali z predpokladu že rozdiel medzi hodnotami

parametra α referenčnej a cieľovej konštrukcie neprekročí 50% a z požiadavky aby sa dané intervaly čo najmenej prekrývali. Každý interval pozostával z 50 hodnôt rovnomerne rozložených v jeho hraniciach. Keďže indexy parametrov tuhosti v Tab. 6 odpovedajú riadkom vo vzťahu (4a), konečná databáza predstavovala maticu s rozmerom [35x50] obsahujúcu hodnoty VF a VT odpovedajúcich cieľovej rámovej konštrukcii s modelovaným príslušným poškodením.

Tab. 6 Databáza poškodení v jednom mieste ($i_p = 1-25$) a vo viacerých miestach ($i_p = 26-35$)

i_p	stav	poloha	α	m
1.	1	-	-	-
2.	2	1	1	1
3.		2	1	1
4.		3	1	1
5.		4	1	1
6.	3	1	1	2
7.		2	1	2
8.		3	1	2
9.		4	1	2
10.	4	1	2	2
11.		2	2	2
12.		3	2	2
13.		4	2	2
14.	5	1	2	3
15.		2	2	3
16.		3	2	3
17.		4	2	3
18.	6	1	3	3
19.		2	3	3
20.		3	3	3
21.		4	3	3
22.	7	1	3	4
23.		2	3	4
24.		3	3	4
25.		4	3	4
26.	8	3	3	4
		4	1	2
27.	-	3	3	4
		4	2	3
28.	-	3	3	4
		4	3	4
29.	-	2	1	2
		4	1	2
30.	-	2	2	3
		4	2	3
31.	9	2	1	2
		3	3	4
		4	1	2
32.	-	2	1	3
		3	3	4
		4	2	2
33.	-	2	1	3
		3	3	4
		4	3	3
34.	-	2	2	3
		3	3	4
		4	2	3
35.	10	2	2	3
		3	3	4
		4	1	2

Takto definované hodnoty boli následne porovnávané s experimentálnymi dátami a na základe navzájom najbližších hodnôt bolo stanovené poškodenie. Pri hľadaní analytického stavu poškodenia ktoré najlepšie odpovedá experimentu, bol použitý jednoduchý genetický algoritmus s populáciou tvorenou celými číslami predstavujúcimi indexy matice databázy poškodení. Ako cieľová funkcia bol použitý vzťah (3) s hodnotou participačného koeficientu $r=1$. Keďže ide o detekciu poškodenia boli vo vzťahu (3) namiesto VČ použité hodnoty vyjadrujúce zmenu v hodnotách VČ zdravej a poškodenej MS ($\lambda_{hi}/\lambda_{di}$).

V Tab. 7 sú uvedené výsledky detekcie pre poškodenie len v jednom mieste konštrukcie (Stav 2–7 v Tab. 2). Ako je možné vidieť v prípade všetkých stavov bol úspešne určený rozsah poškodenia, teda miera uvoľnenia resp odobratia skrutky v mieste spoja. Pri stavoch (2, 3, 6, 7) bola porucha lokalizovaná v uzle č.3 (Obr. 1), čo odpovedá miestu v rámovej konštrukcii kde bolo simulované poškodenie. Naopak v prípade stavov (4 a 5) bolo poškodenie lokalizované v uzle č.4, čo je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené symetrickým charakterom rámovej konštrukcie. Dosiahnuté hodnoty parametra tuhosti α približne odpovedajú hodnotám získaným pri korekcii referenčného modelu, pričom najvýraznejší rozdiel asi 30% je pri stavoch (4 a 5), kde bolo súčasne nepresne lokalizované poškodenie.

Tab. 7 Výsledky detekcie pre jednu polohu poškodenia

	Stav 2	Stav 3	Stav 4	Stav 5	Stav 6	Stav 7
i_p	4	8	13	17	20	24
α	0,63	0,60	0,34	0,33	0,24	0,23

V Tab. 8 sú uvedené výsledky detekcie pre prípad viacnásobného poškodenia pri rôznych hodnotách koeficientu participácie r . Tab. 8 pre $r=1$ zobrazuje výsledky dosiahnuté len pri použití zmien v hodnotách VČ. Pre jednotlivé testované stavy poškodenia odpovedali dosiahnuté výsledky v poradí 26., 27. a 28. riadku v databáze porúch, čo v prípade stavu 8 síce odpovedá poškodeniu simulovanému v monitorovanej MS, ale pre zostávajúce stavy 9 a 10 to už neplatí. Na základe takýchto výsledkov je možné konštatovať, že pri viacnásobnom poškodení sa aj napriek čiastočne úspešnej lokalizácii a akvantiifikácii poškodenia podarilo poruchu len indikovať, teda zistiť že v MS sa nachádza poškodenie. Ako dodatočnú informáciu je možné využiť skutočnosť že porucha bola identifikovaná pre hodnotu indexu poškodenia $i_p=(26, 27, 28)$, čo znamená že MS obsahuje poruchu väčšieho rozsahu. Z dôvodu snahy o presnejšiu detekciu viacnásobného poškodenia bol použitý participačný koeficient $r=0,95$, resp $r=0,80$. Cieľová funkcia bola teda rozšírená o zmenu v hodnotách VT. Ako je možné vidieť v Tab. 8 použitie VT viedlo z pohľadu určenia polohy a rozsahu poškodenia väčšinou k zhoršeniu výsledkov v stavoch 9 a 10. V prípade stavu 8 je možné opäť konštatovať úspešný výsledok, ktorý je spôsobený prevažujúcim vplyvom zmien v hodnotách uvažovaných VČ a taktiež výraznejšou zhodou použitých experimentálnych a analytických VT. Pri stave 9 došlo v oboch prípadoch k nesprávnej lokalizácii a kvantifikácii poškodenia, pričom vzhľadom na výsledky pri hodnote $r=1$ odpovedá nájdený index poškodenia experimentálnemu stavu 6. V poslednom sledovanom prípade došlo síce k miernemu zlepšeniu pri hodnote $r=0,95$, no pri následnom znížení hodnoty koeficientu participácie bolo nájdené výsledne riešenie výrazne nepresné. Na základe výsledkov pri stavoch 9 a 10 je teda vysloviť záver že v MS sa nachádza poškodenie, a že použitie VT nevedlo k zlepšeniu výsledkov detekcie. Toto je pravdepodobne spôsobené nižšou citlivosťou VT na prítomnosť možného poškodenia, prípadne presnosťou, resp. nepresnosťou identifikácie experimentálneho a výpočtu analytického VT.

Tab. 8 Výsledky detekcie pre viacnásobnú polohu poškodenia pre

	Stav 8	Stav 9	Stav 10
$r=1$			
i_p	26	27	28
α	0,23	0,27	0,26
	0,62	0,39	0,26
$r=0,95$			
i_p	26	16	29
α	0,25	0,32	0,55
	0,65		0,55
$r=0,80$			
i_p	26	16	8
α	0,25	0,32	0,67
	0,65		

5. Záver

V tomto príspevku bol prezentovaný problém doprednej detekcie poškodenia, ktorého podstata je založená na porovnávaní experimentálne získaných modálnych parametrov monitorovanej MS s databázou predpokladaných scenárov porúch. Databáza uvažovaných poškodení bola zostavená na základe hodnôt dosiahnutých prostredníctvom EMA referenčnej MS obsahujúcej spoj ekvivalentný k spoju sledovanej MS. Vhodne parametrizovaný matematický model referenčnej MS bol nakorigovaný pomocou experimentálnych dát prislúchajúcich jednotlivým stavom poškodenia simulovaným v spoji referenčnej konštrukcie. Pre takto získané hodnoty korigovaných parametrov bola zostavená databáza možných porúch

monitorovanej MS, a tá následne porovnávaná s jej experimentálnymi modálnymi parametrami.

V rámci experimentálneho overenia bol použitý prístup detekcie poškodenia aplykovaný na rámovú MS obsahujúcu skrutkové spoje. Za referenčnú MS bol zvolený jednoduchý votknutý nosník obsahujúci skrutkový spoj rovnakého charakteru. Pri takto zvolenej experimentálnej MS a adekvátnej parametrizácii pozostávajúcej zo subštruktúrnych a hmotnostných parametrov, bola prezentovaná možnosť detekcie poškodenia vznikajúceho kombinovaným vplyvom redukcie tuhostných a hmotnostných vlastností konštrukcie v mieste spoja. Samotná korekcia modelu a detekcia poškodenia bola realizovaná prostredníctvom jednoduchého genetického algoritmu, pričom v prípade korekcie bola použitá populácia kladných reálnych čísel a pri detekcii kladných celých čísel. Samotné porovnanie experimentálnych a analytických dát bolo realizované prostredníctvom vhodnej cieľovej funkcie a zmien v hodnotách VČ.

Pri poškodení lokalizovanom do jedného miesta konštrukcie, resp. jednej oblasti skrutkových spojov bola vo väčšine prípadov porucha úspešne detekovaná na úrovni 3, teda indikovaná, lokalizovaná aj kvantifikovaná. Naopak pri viacnásobnej polohe poškodenia sa nám aj napriek čiastočným úspechom nepodarilo poruchu detekovať na úrovni 3. Lepšie výsledky neboli dosiahnuté ani v prípade použitia VT, naopak samotné vlastné tvary spôsobili výraznejšie zhoršenie výsledkov detekcie. Takéto výsledky boli pravdepodobne spôsobené nižšou citlivosťou VT na prítomnosť poškodenia a nižšou presnosťou identifikácie experimentálnych, resp. výpočtu analytických tvarov.

6 Literatúra

- Cawley & Adams (1979) The location of defects in structures from measurement of natural frequencies, *Journal of Strain Analysis*, 14 (2), pp. 49-57.
- Čižmár & Starek (2003) Vibration based damage detection via genetic algorithms, in: *Proc. of Engineering Mechanics 2003*, Svratka, (CD medium).
- Doebing et. al. (1996) Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review, *Los Alamos National laboratory Report LA-13070-MS*.
- Friswell et. al (1994) Using vibration data and statistical measures to locate damage in structures, *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental modal Analysis*, 9(4), 239-254.
- Friswell et. al (1998) Combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage structures, *Computer & Structures*, pp. 547-556.
- Goldberg (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Addison-Wesley Publishing*.
- Kvasnička et. al. (2000) Evolučné Algoritmy, *Vydavateľstvo STU*, Bratislava.
- Penny et al. (1993) Damage location in structures using vibration data, in: *Proc. of 11th International Modal Analysis Conference*, pp. 861-867.
- Titurus et. al. (2001) Parametrizácia v detekcii poškodenia mechanickej sústavy so skrutkovými spojami, Časť I. Experiment, in: *Proc. of Mechanical Engineering 2001*, Bratislava, pp. 614-619.
- Yap & Zimmerman (1998) The effect of coding on genetic algorithm based structural damage detection, in: *Proc. of 16th Int. Modal Analysis Conference*, Santa Barbara, pp.165-171