

VIBRATION BASED DAMAGE DETECTION VIA GENETIC ALGORITHMS

K. Čížmár*, L. Starek*

Summary: *In this paper the authors presents the use of global optimization techniques as a viable tool for parametric model-based damage detection especially the application of genetic algorithm as a global stochastic optimization method in vibration-based damage detection process. The purposed method is applied to experimental data obtained from bolted structure measured in various damage states.*

1. Úvod

Detekcia poškodenia založená na využití experimentálne získaných dynamických vlastností (vlastné frekvencie (VF), vlastné tvary (VT), atď.) vychádza z predpokladu, že spomínané dynamické vlastnosti sú funkciou fyzikálnych parametrov mechanickej sústavy (MS) (hmotnosť, tuhosť, tlmiace vlastnosti). Teda, že lokálna zmena fyzikálnych vlastností vyvoláva pozorovateľné zmeny v hodnotách dynamických parametrov, ktoré sú následne použité ako indikátor prípadného poškodenia.

Do skupiny metód založených na uvedenom princípe spadajú aj tzv. *optimalizačné techniky*, ktorých podstata spočíva v snahe dosiahnuť čo najlepšiu možnú zhodu medzi potenciálne poškodenou MS reprezentovanou množinou experimentálnych dát a “zdravou” MS, ktorá je naopak popísaná množinou vhodne zvolených parametrov matematického modelu [2]. Príkladom takýchto metód sú aj postupy ktoré pri riešení daného problému využívajú analógiu s evolučnými procesmi prebiehajúcimi v biologických organizmoch. Konkrétne v tomto príspevku je za účelom korekcie matematického modelu a detekcie malých úrovní poškodenia využitý *jednoduchý genetický algoritmus (GA)*.

Cieľom tohoto príspevku je využitie genetického algoritmu ako predstaviteľa evolučných stratégií v problematike detekcie poškodenia pozostávajúcej z korekcie matematického modelu mechanickej sústavy obsahujúcej skrutkové spoje a následnej detekcie poškodenia vznikajúceho v dôsledku uvoľnenia resp. odobratia jednej skrutky v mieste skrutkového spoja. Matematický model bol pre potreby korekcie a detekcie poškodenia v mieste spoja parametrizovaný skupinou geometrických parametrov [5].

* 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

2. Genetický algoritmus

GA definovaný Hollandom a jeho spolupracovníkmi vychádza z Dárwinovej teórie evolúcie, ktorá je založená na téze prirodzeného výberu čo znamená, že v populácii prežijú len tí jedinci ktorí sa dokážu čo najlepšie prispôbiť okolitému prostrediu. Teda vychádzajúc z jeho definície [4, 6] patrí GA 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 pričom výsledkom je nová populácia "lepších" chromozómov ktorá presnejšie vystihuje definovanú úlohu. Pojem vývoja populácie v sebe skrýva päť základných operácií tvoriacich základnú kostru *jednoduchého GA*, konkrétne: *kódovanie, ohodnocovanie, výber, kríženie, mutácia*.

Kódovanie predstavuje proces pri ktorom dochádza k prevodu reálnej hodnoty optimalizovaného parametra x do tvaru binárneho vektora α dĺžky k . Takto definovanému binárnemu vektoru potom podľa vzťahu (1) [6, 8] prináleží reálne číslo z intervalu $[a, b]$.

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

Rovnica (1) vyjadruje aproximáciu zostaveného reálneho čísla $\text{real}(\alpha)$ 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 $100\%/1023 = 0.0978\%$. V prípade n reálnych premenných sa tieto transformujú ako binárny vektor α dĺžky $k.n$ a takto tvoria jeden chromozóm danej populácie.

Ohodnocovanie definuje priradzovanie *hodnoty fitnessu* jednotlivým členom populácie, pričom *fitness (hodnota fitnessu)* je definovaný ako kladné číslo určujúce schopnosti prežitia a reprodukcie príslušného člena populácie v danom prostredí [3, 4, 6, 8]. Spomínaná fitness funkcia sa stanovuje len na základe vhodne definovanej cieľovej funkcie, teda pre riešenie samotného GA nie je okrem cieľovej funkcie potrebná žiadna iná dodatočná informácia.

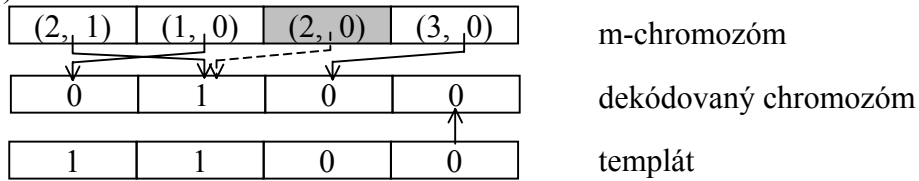
Výber je proces v ktorom sa z aktuálnej populácie na základe stanovených hodnôt fitnessu vytvorí nová populácia *potomkov*, ktoré budú tvoriť nasledujúcu generáciu. Samotný výber *rodičovských chromozómov* predstavuje kvazináhodný proces riadiaci sa len mierou *fitnessu* jednotlivých členov populácie [3, 4].

Kríženie 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 [4, 6].

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) [4, 6]. Náhodnosť tejto operácie je vyjadrená operátorom pravdepodobnosti mutácie P_m .

Efektívnosť takto definovaného jednoduchého GA je možné ďalej zvyšovať rôznymi spôsobmi ktoré sa môžu vzťahovať buď na typ (charakter) riešenej úlohy [3, 4, 8] (bližšie v časti venovanej detekcii poškodenia), alebo môžu byť spojené s modifikáciami už definovaných operátorov, respektíve zavedením nových operátorov do štruktúry GA [4, 6]. Do druhej spomínanej skupiny patrí aj zavedenie tzv. *messy* chromozómu.

Messy chromozóm (m-chromozóm) bol definovaný ako jedna z modifikácií tzv. *messy* GA ktorá zabezpečuje zvýšenie efektívnosti a robustnosti takéhoto evolučného procesu. Samotná modifikácia m-chromozómu spočíva v tom, že tento sa oproti klasickému chromozómu vyznačuje premenlivou dĺžkou a tiež tým, že jeho prvky sú súčasne špecifikované indexom polohy binárnej hodnoty a samotnou binárnou hodnotou, pričom jednotlivé binárne hodnoty sú na základe im prínáležiacich indexov dekódované do tvaru štandardného chromozómu [6] (pozri Obr.1).



Obr. 1 Dekódovanie m-chromozómu pomocou templátu. Index m-chromozómu určuje polohu príslušnej binárnej hodnoty v dekódovanom chromozóme. Ak už konkrétna poloha bola v predchádzajúcom kroku obsadená (index a hodnota v šedom políčku m-chromozómu) potom sa táto špecifikácia ignoruje. Poloha nešpecifikovaná indexom v m-chromozóme sa doplní hodnotou z templátu ktorý sa pri inicializácii GA generuje ako náhodný binárny vektor a v ďalších fázach algoritmu sa nahrádza binárnym vektorom ktorý prislúcha najlepšiemu m-chromozómu z predchádzajúcej generácie.

3. Kódovanie spojitých parametrov

Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcej časti efektívnosť GA je možné zvýšiť aj tým, že zohľadníme typ resp. charakter riešenej úlohy. Ak sa sústredíme len na nami riešený problém detekcie poškodenia je možné veľmi výhodne využiť diskretný charakter poruchy, teda skutočnosť alebo predpoklad že prípadná porucha sa v MS môže vyskytovať len na určitom mieste, napríklad v oblasti spojov. S ohľadom na túto skutočnosť potom môžeme definovať dva druhy premenných: *spojité premenné (sp)* reprezentujúce priamo hodnoty zvolených optimalizovaných parametrov matematického modelu a im odpovedajúce *diskrétné premenné (dp)*, ktoré naopak popisujú miesto prípadného poškodenia. Ináč povedané *dp* definujú problém detekcie poškodenia na úrovni dva (lokalizácia poškodenia) a *sp* poskytujú informáciu na úrovni tri (kvantifikácia rozsahu poruchy).

V tomto zmysle definovali Yap a Zimmerman [8] dve možné metódy tzv. kódovania polohy poškodenia. V Tab.1 je uvedená modifikácia *metódy diskretného mapovania polohy* [8], kde jedna hodnota *dp* bola použitá pre tri *sp* čo viac vyhovuje

Tab.1 Princíp kódovania polohy poškodenia

	pred kódovaním		po kódovaní			
	<i>sp</i>	<i>dp</i>	<i>sp'</i>			
1.	1001	0,60	10	3	1111	1
2.	0010	0,13			1111	1
3.	1101	0,86			1111	1
4.	0100	0,26	01	2	0100	0,26
5.	1011	0,73			1011	0,73
6.	1110	0,93	01	2	1110	0,93
7.	0100	0,26			1001	0,60
8.	0000	0,0			0010	0,13
9.	1010	0,66			1101	0,86

charakteru tejto úlohy (pozri časť 7.1 a 7.3). V Tab.1 určuje jedna dp poradie v akom budú skupiny troch spojitých premenných z predchádzajúcej populácie (sp) zoradené v populácii nasledujúcej (sp'), pričom ak určitá poloha nie je špecifikovaná hodnotou dp , odpovedajúcej skupine sp' budú priradené hodnoty 1.

4. Cieľové funkcie

Detekcia poškodenia predstavuje problém pri ktorom hľadáme také hodnoty parametrov, ktoré minimalizujú zvolené cieľové funkcie (CF), pričom tieto môžeme na základe použitých analytických a experimentálnych dát rozdeliť do nasledujúcich skupín.

CF využívajúca zmeny v hodnotách VF môže byť definovaná napríklad nasledujúcim vzťahom [3]

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

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

V prípade použitia zmien VT pri definovaní vhodnej CF je rovnako ako v prípade VF možné použiť viacero kritérií založených na porovnávaní VT zdravej a potenciálne poškodenej MS. Napríklad v prípade použitia kritéria modálnej vernosti (MAC) môžeme CF napísať v nasledujúcom tvare [3]

$$J_f(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n (1 - MAC(\mathbf{v}_{ei}, \mathbf{v}_{ai}(\mathbf{a}))) w_i \quad (3)$$

kde n je počet použitých VT, vektor \mathbf{v}_e a \mathbf{v}_a predstavuje experimentálny resp. analytický VT. Využitie VT pri detekcii poškodenia nie je v niektorých prípadoch vzhľadom na ich nižšiu citlivosť na prípadne poškodenie výhodné.

Kombináciou hodnôt zmien VF a VT môžeme CF písať napríklad v nasledujúcom tvare [8]

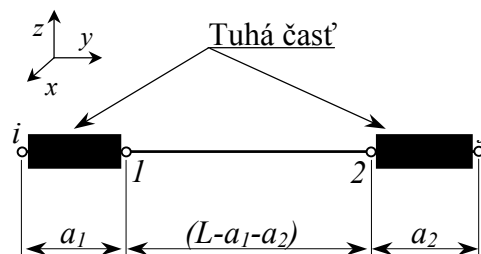
$$J_f(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \frac{|\lambda_{ai}(\mathbf{a}) + \lambda_{ei}|}{\lambda_{ae}} w_i + \|\mathbf{V}_a(\mathbf{a}) + \mathbf{V}_e\|_f h \quad (4)$$

kde n predstavuje počet VF 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 a w_i a h predstavujú váhové koeficienty porovnávaných VČ a VT. 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 všetkých uvedených tvarov CF potom spočíva v nájdení takého vektora vybraných parametrov \mathbf{a} ktorý minimalizuje hodnotu zvolenej cieľovej funkcie.

5. Geometrické parametre

Podstata geometrických parametrov vychádza z definície Euler-Bernuliho nosníkového prvku s tzv. premenlivou tuhosťou [5] (Obr.2), ktorý bol zavedený na základe predpokladu, že tuhosť MS v mieste spoja je vyššia než tuhosť v okolí spoja. Vychádzajúc z Obr.2 a predpokladu že K_e a M_e sú elementové matice tuhosti, resp. hmotnosti štandardného nosníkového prvku dĺžky $(L-a_1-a_2)$, ktorého stupne voľnosti sú zapísané v nasledujúcom vektore



Obr.2 Nosníkový element s premenlivou tuhosťou

$$\mathbf{dof}_{i2} = [y_1 \ z_1 \ \varphi_{y1} \ \varphi_{z1} \ y_2 \ z_2 \ \varphi_{y2} \ \varphi_{z2}] \quad (5)$$

môžeme na základe geometrie a predpokladu malého kmitania zaviesť obdobný vektor aj pre prvok z Obr.2.

$$\mathbf{dof}_{ij} = [(y_1 - a_1 \varphi_{z1}) \ (z_1 - a_1 \varphi_{y1}) \ \varphi_{y1} \ \varphi_{z1} \ (y_2 + a_2 \varphi_{z2}) \ (z_2 + a_2 \varphi_{y2}) \ \varphi_{y2} \ \varphi_{z2}] \quad (6)$$

Transformačná matica \mathbf{T} nosníkového prvku s premenlivou tuhosťou je potom definovaná ako inverzná matica k transformačnej matici stupňov voľnosti \mathbf{Q} podľa nasledujúcich vzťahov.

$$\mathbf{dof}_{ij} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{dof}_{i2} \quad \mathbf{dof}_{i2} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{dof}_{ij} \quad (7a, 7b)$$

Elementové matice Euler-Bernuliho prvku s premenlivou tuhosťou sú potom určené na základe nasledujúcich rovníc.

$$\mathbf{K}'_e(L, a_1, a_2) = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_e \mathbf{T} \quad \mathbf{M}'_e(L, a_1, a_2) = \mathbf{T}^T \mathbf{M}_e \mathbf{T} \quad (8a, 8b)$$

To či takto zavedené parametre a_1 a a_2 budú použité súčasne, alebo každý samostatne záleží od typu a konštrukcie miesta v MS na modelovanie ktorého bude takýto prvok použitý.

6. Kontrola správnosti výsledkov detekcie poškodenia

Správnosť výsledkov detekcie poškodenia je s ohľadom na charakter úlohy vhodné overiť testom správnosti. Vychádzajúc z princípu použitého Contursim [1] budeme v našom prípade definovať skúšku správnosti na základe nasledujúcej rovnice.

$$\delta \mathbf{z} = \mathbf{S} \cdot \delta \mathbf{p} \quad (9)$$

kde $\delta \mathbf{z}$ a $\delta \mathbf{p}$ je vektor zmien v hodnotách modálnych dát (VČ, VT, atď.), resp. vektor zmien parametrov získaných detekciou poškodenia a \mathbf{S} je matica citlivosti napr. VČ na zvolený parameter. Podstata spočíva v tom, že ak parameter lokalizuje poškodenie nesprávne dá sa očakávať že jeho príspevok ku korelácii medzi hodnotami zmien vlastných frekvencií zdravej a poškodenej MS bude malý. Teda ak vektor $\delta \mathbf{p}$ lokalizuje poškodenia v mieste j správnosť výsledku si môžeme overiť tak, že po prepočte rovnice (9) pre $\delta \mathbf{p}_j = 0$ bude miera korelácie medzi analytickým vektorom $\delta \mathbf{z}$ a jemu odpovedajúcim experimentálnym vektorom malá v prípade nesprávnej lokalizácie, alebo naopak výrazná pre správnu lokalizáciu poruchy.

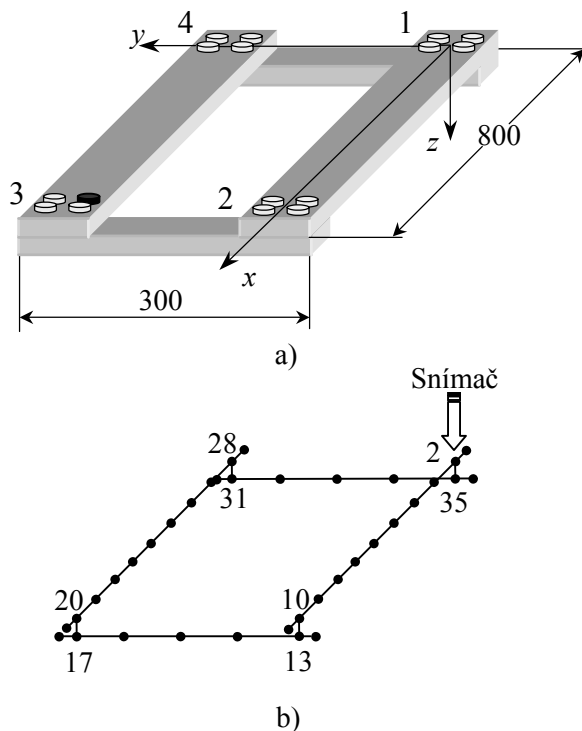
Jednoduchým prepočtom potom môžeme definovať aby maximálna hodnota kritéria správnosti odpovedala správnej lokalizácii poškodenia (pozri časť venovanú detekcii porúch).

7. Numerický príklad

7.1. Popis experimentálnej sústavy

V Obr.3a a 3b je zachytená meraná MS, resp. jej MKP diskretizácia, ktorá bola použitá pri korekcii matematického modelu a následnej detekcii poškodenia. Oblasť skrutkového spoja bola modelovaná pomocou nehmotného nosníkového prvku s premenlivou tuhosťou (Obr.4), pričom prídavne hmotnosti od skrutiek boli modelované pomocou sústredenej hmoty. Porucha bola simulovaná v mieste skrutkového spoja prostredníctvom uvoľnenia, resp. odobratia jednej skrutky v uzle č.3 (pozri Obr.3a).

Experimentálne hodnoty VF získané prostredníctvom experimentálnej modálnej analýzy (EMA) pre zdravú MS, *Stav I* a dve úrovne poškodenia, *Stav II* (jedna uvoľnená skrutka v uzle č.3) a *Stav III* (odobratá skrutka v uzle č.3) sú uvedené v Tab.2. Šedé políčka v Tab.2 odpovedajú rovinným VT, ktoré neboli pri korekcii modelu a detekcii poškodenia uvažované. Podrobný popis meranej MS a realizovanej EMA je uvedený v literatúre [7].



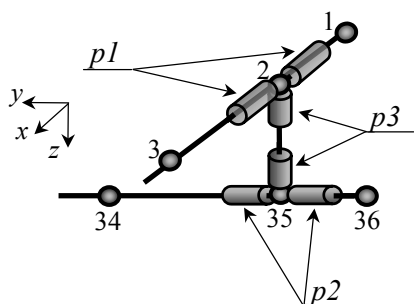
Obr.3 Schéma meranej mechanickej sústavy a jej MKP diskretizácia

Tab.2 Namerané VF pre *Stav I-III*

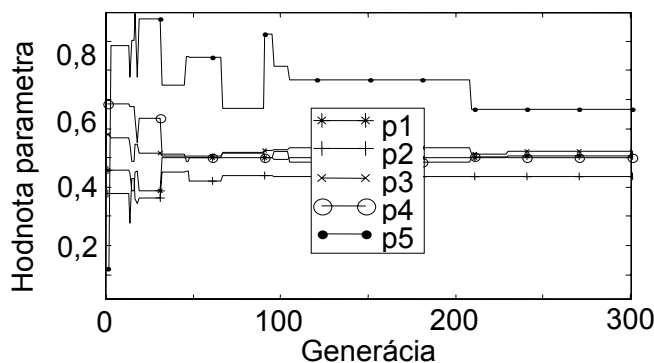
	<i>Stav I</i>	<i>Stav II</i>	<i>Stav III</i>
1.	35.93 (0)	35.91 (0.04)	35.94 (-0.03)
2.	41.46 (0)	41.37 (0.20)	41.44 (0.04)
3.	67.33 (0)	67.26 (0.10)	67.36 (-0.03)
4.	109.95 (0)	109.93 (0.02)	109.95 (0.00)
5.	158.42 (0)	158.29 (0.08)	158.42 (-0.00)
6.	203.89 (0)	203.71 (0.09)	203.68 (0.10)
7.	241.25 (0)	241.84 (-0.24)	241.83 (-0.23)
8.	280.56 (0)	280.41 (0.05)	280.49 (0.02)
9.	284.62 (0)	284.39 (0.08)	284.49 (0.04)
10.	294.60 (0)	294.48 (0.03)	294.62 (-0.00)
11.	406.70 (0)	404.31 (0.58)	404.38 (0.57)
12.	416.07 (0)	415.76 (0.07)	415.85 (0.05)
13.	456.18 (0)	455.91 (0.06)	456.00 (0.04)

7.2 Korekcia matematického modelu

Pri korekcii matematického modelu bolo s výnimkou rovinných módov použitých jedenásť deformačných VT a im prináležiacich VF (Tab.3), pričom bola použitá cieľová funkcia uvedená vo vzťahu (4). Z dôvodu zvýšenia efektívnosti riešenia GA bol použitý messy chromozóm. Pri voľbe vhodného spôsobu parametrizácie boli zohľadnené ako vplyvy nepresností prvotného modelu tak aj skutočnosť následného využitia pri detekcii poškodenia. Celkovo bolo zvolených päť parametrov, z ktorých prvé tri parametre popisovali oblasť skrutkových spojov (*geometrické parametre aplikované na maticu tuhosti*) (pozri Obr.4) a ďalšie dva parametre boli definované globálne pre celú MS s výnimkou oblastí skrutkových spojov (ohybová tuhosť $p_4=EI_y$ a torzná tuhosť $p_5=GI_x$ tyčí).



Obr.4 Parametrický nosníkový model skrutkového spoja

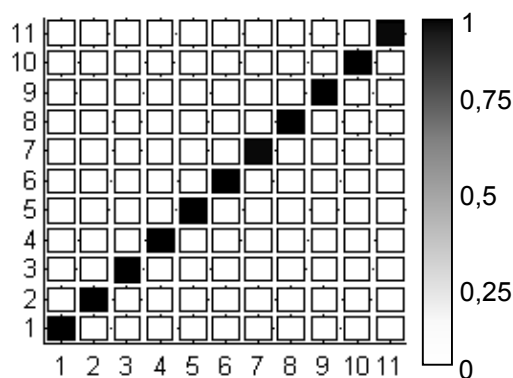


Obr.5 Priebeh hodnôt zvolených parametrov

V Obr.5 je znázornený priebeh korekcie matematického modelu pre normované hodnoty parametrov pre 300 generácií GA. Výsledok korekcie pre hodnoty VF je uvedený v Tab.3, kde je oproti prvotnému modelu dobre patrné výrazne zlepšenie hodnôt v poradí 7., 8. a 9. VF. V Obr.6 sú znázornené hodnoty MAC kritéria pre korigované a experimentálne VT, pričom vo všetkých prípadoch došlo k zvýšeniu korelácie a najnižšia hodnota 97,9% odpovedala v poradí 7. VT. Je teda možné konštatovať že pre danú cieľovú funkciu, pri využití *m-chromozómu* a pre uvedený spôsob parametrizácie miesta skrutkového spoja pomocou geometrických parametrov došlo pri korekcii pomocou jednoduchého GA vo väčšine prípadov k zlepšeniu hodnôt VF matematického modelu a vo všetkých prípadoch k zvýšeniu korelácie VT.

Tab.3 Výsledky korekcie matematického modelu

	f_{MKP}	$f_{korigované}$	$f_{merané}$	$(f_{MKP}-f_{me})/f_{me} * 100$	$(f_{kor}-f_{me})/f_{me} * 100$
1.	35,58	35,53	35,93	-0,96	-1,10
2.	40,46	41,95	41,46	-1,82	1,18
3.	65,33	66,04	67,33	-3,87	-1,91
4.	109,81	109,67	109,95	-0,13	-0,25
5.	153,46	156,59	158,42	-3,13	-1,15
6.	210,99	209,19	203,89	3,47	2,59
7.	300,12	279,49	280,56	6,97	-0,38
8.	279,46	283,52	284,62	-1,81	-0,38
9.	303,18	294,44	294,60	2,91	-0,05
10.	423,31	423,44	416,07	1,73	1,77
11.	453,05	456,97	456,18	-0,68	0,17



Obr.6 Porovnanie nameraných a korigovaných VT pomocou MAC kritéria

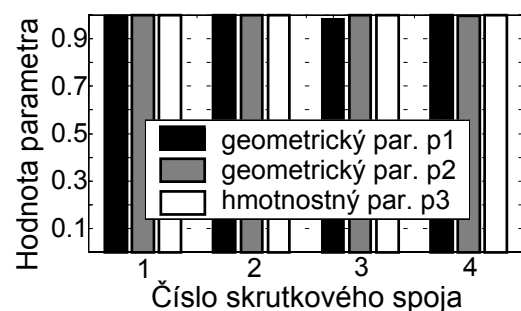
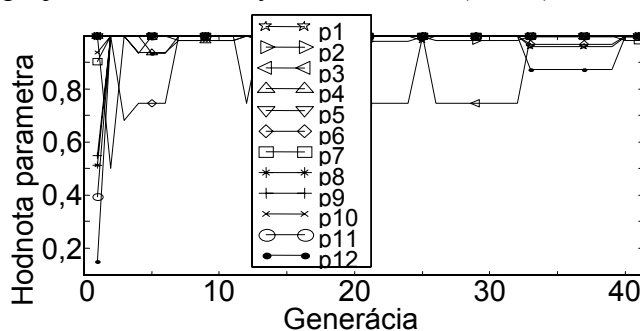
7.3 Detekcia poškodenia

Detekcia poškodenia bola realizovaná na základe korigovaného matematického modelu, pri využití jedenástich VT a VF uvedených v Tab.2, teda VF a VT použitých pri korekcii. V rámci tohoto príspevku sú ako už bolo spomenuté uvažované dve úrovne poškodenia menšieho rozsahu reprezentované *Stavom II*, teda uvoľnenou skrutkou v rohu č.3 (tmavý od v Obr.3a v spoji č.3) a *Stavom III* reprezentujúcim chýbajúcu skrutku (rovnaké miesto ako pri stave dva). S ohľadom na malý rozsah poškodenia bola použitá cieľová funkcia uvedená v rovnici (2), pri využití rozdielov hodnôt experimentálnych a analytických VF. VT boli použité len z dôvodu správneho priradenia analytických módov k experimentálnym. Na rozdiel od korekcie bol pri detekcii poškodenia použitý GA so štandardným chromozómom a efektívnosť riešenia bola zvýšená aplikovaním metódy kódovania polohy poškodenia uvedenej v tretej časti a zohľadňujúcej aktuálnu parametrizáciu, pričom *diskrétne premenné* popisovali miesta skrutkových spojov (hodnoty 1 až 4, podľa Obr.3a). Pri voľbe parametrov sme vychádzali z možných typov poškodenia, teda prípadné zníženie tuhosti v dôsledku uvoľnenia skrutky je popísané dvoma geometrickými parametrami schopnými zachytiť zmenu tuhosti $p1$ a $p2$ podľa Obr.4 a pre prípad straty skrutky bol zavedený hmotnostný parameter $p3$.

V Obr.7 a 8 sú zachytené výsledky detekcie poškodenia v prípade *Stavu II*, resp *Stavu III*. V Obr. 7a a 8a je zaznamenaný priebeh hodnôt normovaných parametrov počas výpočtu GA vo vopred zvolenom rozsahu štyridsiatic generácií. V Obr. 7(b, c) a 8(b, c) sú následne prezentované výsledky dosiahnutých hodnôt zvolených parametrov, resp. im odpovedajúcich hodnôt kritérií správnosti, kde skupiny stĺpcov odpovedajú oblastiam skrutkových spojov v MS a samotné stĺpce určujú priame hodnoty jednotlivých parametrov, prípadne kritérií správnosti.

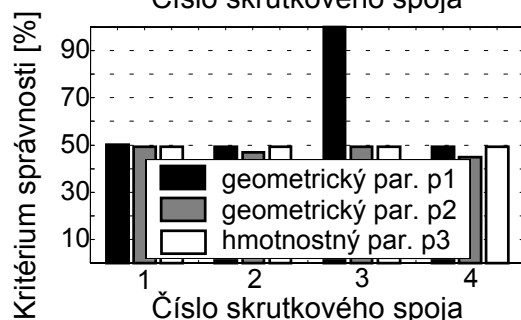
Detekcia poškodenia v Stave II

Podľa výsledku uvedeného v grafe 7b je poškodenie identifikované prvým parametrom tuhosti v tretej skupine stĺpcov, čo odpovedá približne 2% poklesu hodnoty parametra tuhosti $p1$ v mieste spoja č.3 (Obr.3a), a teda správne poukazuje na prítomnosť simulovaného poškodenia. S ohľadom na rozsah poškodenia ktoré sa v hodnotách vlastných frekvencií prejavilo minimálnymi zmenami (Tab.2), a taktiež s ohľadom na skutočnosť že konečné



Obr.7 Výsledky detekcie poškodenia
Stav I - Stav II

- priebeh hodnôt zvolených parametrov
- konečné hodnoty zvolených parametrov
- kritérium správnosti pre výsledky detekcie poškodenia

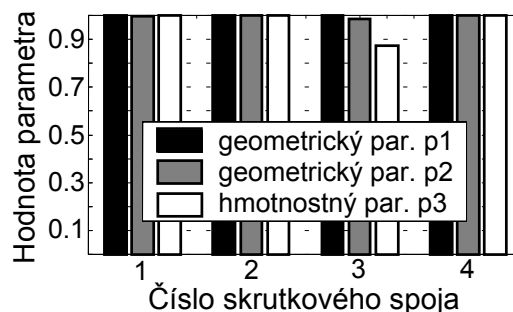
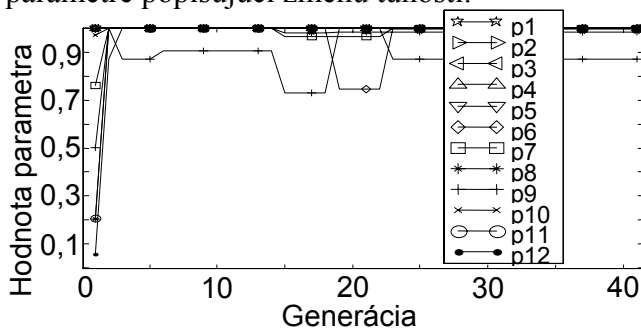


riešenie bolo nájdene tesne pred uplynutím stanoveného limitu štyridsiatic generácií (Obr.7a) GA, čo môže vzbudzovať dojem že v prípade dlhšieho výpočtu by mohlo dôjsť k zmene výsledku, je vhodné vykonať akúsi skúšku správnosti. Výsledky testu ktorého princíp je popísaný v časti 6 sú znázornené v Obr.7c, kde je možné vidieť výraznú hodnotu kritéria správnosti prislúchajúcu parametru indikujúcemu v Obr.7b poškodenie. Taktiež je však v Obr.7c možné vidieť výraznejšie hodnoty kritérií správnosti prislúchajúcich ostatným parametrom, čo je indikátorom pomerne nízkej hodnoty korelácie medzi vektormi zmien experimentálnych a analytických VF použitých pri výpočte cieľovej funkcie.

Detekcia poškodenia v Stave III

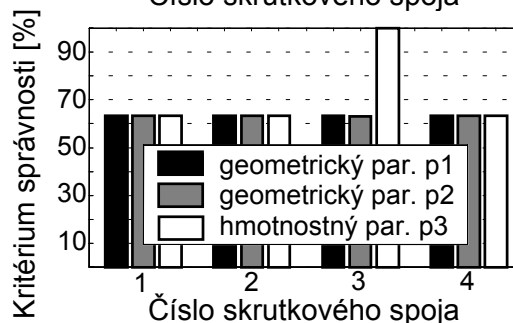
V tomto prípade je možné na základe Obr.8b konštatovať že k najvýraznejšiemu poklesu v hodnotách zvolených parametrov došlo v tretej skupine stĺpcov ktorá tak ako v predchádzajúcom prípade odpovedá oblasti MS v Obr.3a označenej číslom 3. Konkrétne sa jedná o druhý geometrický parameter p_2 indikujúci približne dvojpercentný pokles tuhosti v mieste spoja č.3 a tretí parameter p_3 predstavujúci asi pätnásťpercentný úbytok hmotnosti. Pri ohľade na skutočnosť že každá oblasť spoja obsahuje štyri skrutky, a teda že odobratie jednej by sa malo prejavíť poklesom hmotnosti v tomto mieste asi o 25% je možné predpokladať že v mieste uvedeného skrutkového spoja došlo k odobratiu jednej skrutky.

Rovnako ako v predchádzajúcom prípade je s ohľadom na charakter poškodenia vhodné podrobiť dosiahnutý výsledok testu správnosti. Jeho výsledok je uvedený v Obr.8c, kde sa však správnosť detekcie poškodenia potvrdila len pre prípad parametra hmotnosti. Toto môže byť rovnako ako v predchádzajúcom prípade spôsobené pomerne nízkou koreláciou medzi vektormi zmien experimentálnych a analytických VF, čoho dôkazom sú aj výrazne hodnoty kritérií správnosti pre parametre mimo miesta indikácie poškodenia, a taktiež aj tým, že do spomínanej korelácie prispieva parameter hmotnosti podstatne výraznejšie než geometrický parameter popisujúci zmenu tuhosti.



Obr.8 Výsledky detekcie poškodenia
Stav I - Stav III

- priebeh hodnôt zvolených parametrov
- konečné hodnoty zvolených parametrov
- kritérium správnosti pre výsledky detekcie poškodenia



8. Záver

Jednoduchý GA bol v tomto príspevku aplikovaný na problém korekcie matematického modelu MS obsahujúcej skrutkové spoje a následne bol využitý pri detekcii poškodenia, ktoré bolo v MS simulované uvoľnením resp. odobratím jednej skrutky v mieste spoja. Použitý matematický model bol vytvorený pomocou trojrozmerného Euler-Bernuliho nosníkového

prvku, pričom miesta skrutkových spojov boli z dôvodu možnosti zavedenia geometrickej parametrizácie modelované modifikovaným 3D Euler-Bernuliho prvkom s premenlivou tuhosťou.

Vhodnosť zvolenej parametrizácie sa potvrdila pri korekcii matematického modelu výrazným zvýšením zhody medzi experimentálnymi a analytickými VF a VT, kde najmä vysoké hodnoty MAC kritérií potvrdili fyzikálnu podstatu realizovanej korekcie.

Aj napriek malému rozsahu simulovanej poruchy, ktorá sa v prípade VF prejavila len ich minimálnymi zmenami bolo možné pri použití jednoduchého GA, zvolenej cieľovej funkcie a v neposlednom rade aj na základe vhodne použitej metódy kódovania polohy poškodenia pomerne presne detekovať túto poruchu a v rámci dosiahnutých výsledkov aj kvantifikovať rozsah poškodenia. Správnosť dosiahnutého výsledku bola úspešne overená testom správnosti, ktorý bol založený na využití citlivosti zmien modálnych dát na zmeny v hodnotách zvolených parametrov. Metóda použitá pri kontrole správnosti však aj napriek dosiahnutým výsledkom poukazuje na základe výrazných hodnôt kritérií mimo oblasti indikácie poškodenia na problematiku takejto detekcie, prezentovanú mierou korelácie medzi experimentálnymi a analytickými dátami.

9. Literatúra

- [1] Contursi T., Messina A., Williams J.E. (1998) Detection of Damage at Multiple Sites with a Correlation and Iterative Schemes, *Proc. of the 16th Int. Modal Analysis Conference*, Santa Barbara, pp.1725-1731
- [2] Friswell M.I., Mottershead J.E. (1995) Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht
- [3] Friswell K.I., Penny J.E.T., Garvey S.D. (1998) A Combined Genetic and Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures, *Computers&Structures*, pp.547-556
- [4] Goldberg D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing
- [5] Horton B., Gurgenci H., Veidt M., Friswell M.I. (1999) Finite Element Model Updating of the Welded Joints in a Tubular H-Frame, *Proc. of the 17th Int. Modal Analysis Conference*, Orlando, pp.1556-1562
- [6] Kvasnička V., Pospichal J., Tiňo P. (2000) Evolučné Algoritmy, Vydavateľstvo STU, Bratislava
- [7] Titurus B., Čižmár K., Starek L. (2001) Parametrizácia v Detekcii Poškodenia Mechanickej Sústavy so Skrutkovými Spojmi, Časť I. Experiment, Zborník referátov III. časť, *Strojné Inžinierstvo 2001*, Bratislava, str.614-619
- [8] Yap K.C., Zimmerman D.C. (1998) The Effect of Coding on Genetic Algorithms Based Structural Damage Detection, *Proc. of the 16th Int. Modal Analysis Conference*, Santa Barbara, pp.165-171