

PARAMETRIZÁCIA V DETEKCII POŠKODENIA MECHANICKEJ SÚSTAVY SO SKRUTKOVÝMI SPOJMI, KOREKCIA MATEMATICKÉHO MODELU

Kvetoslav ČIŽMÁR, Ladislav STAREK *

Abstrakt: Vibrodiagnostické metódy založené na využití dynamických vlastností mechanických sústav (MS) predpokladajú možnosti detekcie poškodenia na základe zmien práve týchto údajov. V prípade tzv. "model based" metód, teda metód využívajúcich matematický model MS, je jedným z rozhodujúcich kritérií korektnosti vibrodiagnostického procesu práve miera zhody medzi analytickým modelom a experimentálne získanými údajmi, ktoré popisujú nepoškodený stav mechanickej sústavy. Tento príspevok je pokračovaním úlohy ktorej cieľom bolo zabezpečenie množiny experimentálnych dát, s cieľom ďalšieho využitia v procesoch korekcie modelu a detekcie poškodenia. Konkrétne je venovaný otázke korekcie matematického modelu nepoškodenej MS so skrutkovými spojmi.

Kľúčové slová: detekcia poškodenia, metóda konečných prvkov, parametrizácia, skrutkový spoj

1. ÚVOD

Pri detekcii poškodenia s využitím matematického modelu (označujeme aj ako tzv. *model based* metódy) mechanickej sústavy (MS) zohráva veľmi dôležitú úlohu miera zhody matematického modelu s experimentom, a práve korekcia matematického modelu MS je možným prístupom ako zvýšiť mieru korelácie medzi dynamickým správaním sa modelu a skutočnou konštrukciou. Metódy korekcie matematického modelu môžeme rozdeliť na

- Priame metódy korekcie
- Iteračné metódy korekcie

Priame metódy [3] používajú ako vstup koeficientové matice hmotnosti **M** a tuhosti **K** mechanickej sústavy zostavené pomocou metódy konečných prvkov (MKP) a experimentálne údaje (vlastné tvary (VT) a vlastné frekvencie (VF)) získané pomocou experimentálnej modálnej analýzy (EMA), pričom EMA ako vstup je považovaná za správny, teda refenčný na základe ktorej vykonávame korekciu matematického

Prof. Ing. Ladislav Starek, CSc. (<u>starek@cvt.stuba.sk</u>), Ing. Kvetoslav Čižmár (<u>cizmar@sjf.stuba.sk</u>) Katedra technickej mechaniky, Strojnícka fakulta STU, Nám. Slobody17, 812 31 Bratislava, Slovenská republika

modelu. Iteračné metódy [3] na rozdiel od priamych vernejšie zachytávajú fyzikálnu podstatu problému, pričom korekcia predstavuje snahu nájsť zle odhadnuté parametre MS, ktoré môžu predstavovať ktorúkoľvek fyzikálnu veličinu použitú pri zostavovaní modelu pomocou MKP.

Cieľom tohoto príspevku je vzájomné porovnávanie a vyhodnotenie dvoch rônych typov parametrizácie pri rozdielnych spôsoboch modelovania skrutkového spoja v MS za účelom korekcie matematického modelu pomocou iteračnej metódy citlivosti parametra s následným využitím v oblasti detekcie poškodenia.

2. POUŽITÝ MATEMATICKÝ MODEL

S ohľadom na tvar a konštrukciu meranej mechanickej sústavy [6], bol pri korekcii použitý matematický model mechanikej sústavy uvedený na Obr.1b. Model bol vzhľadom na charakter mechanickej sústavy vytvorený pomocou trojrozmerného Euler-Bernuliho nosníkoveho prvku so šiestimi stupňami voľnosti v každom uzle (celkovo to predstavuje pri používaní modelu s tridsiatimišiestimi uzlami problem v rozsahu 216 stupňov voľnosti). Diskretizácia uvedeného modelu bola volená tak, aby zodpovedala experimentu [6] a súčastne aby bolo pomocou nej možné čo najpresnejšie zachytiť fyzikálnu podstatu reálnej MS, a teda aby sa na čo najmenšiu mieru obmedzili možné chyby spôsbené práve nesprávnou diskretizáciou.

Prítomnosť snímača zrýchlenia a skrutiek v spojoch konšrukcie bola zasa modelovaná použitím sústredenej hmoty, tzv. '*mass*' elementu. S ohľadom na nižšie uvedný spôsob modelovania skrutkového spoja (keďže sme ho neuvažovali ako dokonale tuhý prvok tzv.'rigid joint element') sme jednu polovicu tejto prídavnej hmoty vložili do *i*-teho a druhú polovicu do *j*-teho uzla prvku definujúceho v modeli skrutkový spoj v MS (pozri Obr.1b).

Otázku modelovania samotného srutkového spoja sme sa z dôvodu preskúmania viacerých možných prístupov rozhodli riešiť dvoma rôznymi spôsobmi. V prvom prípade sme sa rozhodli pre vyskúšanie modelovania skrutkového spoja pomocou pružinového elementu tzv. '*spring join*' elementu. Naopak pri druhom spôsobe sme sa rozhodli pre možnosť využitia trojrozmerného Euler-Bernuliho nosníkového prvku.



Obr.1 Schéma a diskretizácia meranej MS

Pružinový model skrutkového spoja,

Ako jedna zo schodnych ciest pri modelovaní skrutkového spoja sa ukazuje možnosť použitia pružinového elementu. Takýto element ako je možné vidieť na Obr.2

sme umiestnili medzi neutrálne osi dvoch navzájom si prináležiacích častí mechanickej sústavy v mieste spoja, pričom vzájomné prepojenie týchto dvoch častí je vykonané jednotlivých navzájom prepojením si odpovedajúcich stupňov voľnosti dvoch sebe prináležiacich uzlov matematického modelu v oblasti spoja. Pre náš prípad priestorového problému sa jedná o tri translačné (k_x – translačná pružina v smere osi x, $k_y - v$ smere osi y a $k_z - v$ smere osi z) a tri rotačné pružiny (k_{ox} - rotačná pružina okolo osi x, $k_{\phi y}$ – okolo osi y a $k_{\phi z}$ – okolo osi z).

Nosníkový model skrutkového spoja,

Druhý spôsob modelovania skrutkového spoja (Obr.3) ktorý sme sa rozhodli použiť bol založený na využití rovnakého elementu ako pri modelovaní samotnej mechanickej sústavy, teda Euler-Bernuliho nosníkového trojrozmerného prvku. Tento spôsob modelovania skrutkového spoja sa nám z pohľadu možnosti lepšieho zachytenia správania sa skrutkového spoja javil ako veľmi vhodná alternatíva k horedefinovanému pružinovému elementu.

Tak ako v prípade tzv. '*spring joint*' elementu bol aj tento nosníkový prvok vložený do uzlov na neutrálnych osiach dvoch sebe navzájom prináležiacich častí modelovanej MS, pričom z dôvodov zachovania celkovej hmotnosti mechanickej sústavy bol tento element volený ako nehmotný. Tak ako vzdialenosť neutrálnych osí (je rovnaka pre oba prípady modelu spoja) aj rozmery použitého nosníkového prvku (rozmer použitého elementu bol 40x40x6) vyplývajú z konštrukcie skrutkového spoja na meranej MS [6].

3. VOĽBA PARAMETROV PRE KOREKCIU

Výsledok procesu korekcie matematického modelu popísaného v predchádzjúcej časti do značnej miery závisí od správnej voľby vhodných parametrov. V rámci tohoto článku sme sa zamerali na parametre fyzikálneho charakteru (θ_j , j = 1, ..., l), ktorých mieru vplyvu na príslušnú mechanickú sústavu môžeme vyjadriť ako [3]

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{0} + \sum_{j=l}^{l} \delta \theta_{j} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \theta_{j}} \qquad \mathbf{K} = \mathbf{K}_{0} + \sum_{j=l}^{l} \delta \theta_{j} \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \theta_{j}} \qquad (1a, b)$$

M a **K** predstavujú globálne matice hmotnosti resp. tuhosti celej MS, $\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \theta_j} a \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \theta_j}$



Obr.3 Parametrický nosníkový model skrutkového spoja

derivácie týchto matíc podľa zvolených parametrov a matice M_0 , K_0 popisujú neparametrizovanú časť MS.

Konkrétne pre nami definované matematické modely sme sa rozhodli zvoliť nasledujúce fyzikálne parametre.

Pružinový model skrutkového spoja,

Parametre takto modelovanej mechnickej sústavy sme volili na základe intuície, pričom sme vychádzali z charakteru MS, konštrukcie spoja a taktiež z vizualizovaných VT škrupinového modelu vytvoreného za týmto účelom v programe ANSYS. Priamo na korekciu sme sa rozhodli použiť dve skupiny parametrov.

Prvá skupina bola spojená s časťou MS modelovanou pomocou nosníkových prvkov, bez uvažovania skrutkových spojov (Obr.1b). Pri výbere týchto parametrov sme sa deformačnými riadili tvarmi už spomenutého škrupinového modelu v najväčšej ktorom deformácii k dochádzalo v rovine [Y-Z] (pozri Obr.1a) a súčasne sa najmä pri vyšších VT výraznejšie prejavovala aj torzná deformácia časti MS tvorenej tyčami [6]. Na tomto základe sme za parametre zvolili tuhosť v ohybe okolo osi y (EI_v) a taktiež kôli možnosti korekcie torzných VT aj tuhosť v krútení nosníkového prvku (GI_x) . Keďže sme sa zamerali na problém kedy počet parametrov



Obr.4 Spôsob rozdelenia parametrov v MS Pozn.: Indexi označujú poradivé čísla parametrov

presahuje počet experimentálnych dát (podrobnejšie v nasledujúcej časti), bolo zvolených celkovo 16 takýchto parametrov (pre usporiadanie parametrov pozri Obr.4).

Druhú skupinu predstavovali dva parametre volené spoločne pre všetky štyri pružinové prvky (pozri Obr.1a a Obr.2). Pri ich voľbe sme vychádzali zo správania sa škrupinového modelu v oblasti modelovaných skrutkových spojov a taktiež z citlivosti vlastného čísla (pozri časť venovanú popisu metódy použitej pri korekcii) na možné zvolené parametre. Z množiny šiestich možných parametrov (pozri druhú kapitolu, časť venovanú popisu pružinového spoja) sme vybrali dva, k_{qx} (rotačná pružina okolo osi x) a k_{qy} (rotačna pružina okolo osi y).

Celkovo sme teda pre korekciu matematického modelu zvoli 18 parametrov, z ktorých 16 popisovalo fyzikálne vlastnosti tyčí v konštrukcii a zostávajucimi dvoma sme sa s ohľadom na proces korekcie snažili zachytiť podstatu skrutkového spoja (pozri Obr.1a, b).

Nosníkový model skrutkového spoja,

Spôsob voľby a taktiež výsledný počet parametrov bol rovnaký ako pri pružinovom modele spoja (celkovo 18 parametrov (16 parametrov zvolenych v MS bez uvažovania spoja, ďalšie dva pre modelovaný skrutkový spoj)). Keďže v tomto prípade je spoj modelovaný pomocou tzv. *'beam'* elementu, zvolili sme v tomto mieste ako parameter tuhosť v ohybe (EI_{ys}) a tuhosť v krútení v osi nosnikového prvku (GI_{xs}). Pri

voľbe parametra ' GI_{xs} ' sme vychádzali tiež z predpokladu že pri modelovaní spoja pomocou nosníkového prvku (pozri Obr.3) bude hodnota ' GI_{xs} ' s najväčšou pravdepodobnosťou presahovať skutočnú hodnotu, ktorá by odpovedala reálnym podmienkam v skrutkovom spoji, a teda jej zmena by mohla prispieť k vylepšeniu niektorých VF.

4. POUŽITÁ METÓDA KOREKCIE

Metóda citlivosti parametra,

Je dobre známe že citlivosť *i*-teho vlastného čísla (VČ) λ_i na zmeny vykonané v *j*-tom definovanom parametri θ_j , môžeme jednoducho určiť na základe známej hodnoty príslušného *i*-teho VČ λ_i a jemu odpovedajúceho *i*-teho VT Φ_i na základe nasledujúceho vzťahu [3], [4]

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \theta_j} = \mathbf{S}_{ij} = \mathbf{\Phi}_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \theta_j} - \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \theta_j} \right) \mathbf{\Phi}_i$$
(2)

kde S_{ij} predstacuje citlivosť *i*-teho vlastného čísla na *j*-ty parameter. Úlohu korekcie odhadovaných parametrov potom môžeme definovať ako problém minimalizácie pokutovej funkcie s ohľadom na zvolené parametre, pričom spomenutú pokutovú funkciu môžeme vyjadriť nasledujúcim spôsobom [3]

$$J(\delta \mathbf{\theta}) = (\delta \lambda - \mathbf{S} \delta \mathbf{\theta})^T \mathbf{W}_{\lambda} (\delta \lambda - \mathbf{S} \delta \mathbf{\theta}) + \delta \mathbf{\theta}^T \mathbf{W}_{\theta} \delta \mathbf{\theta}$$
(3)

Potom pre odhad parametra po k-tej iterácii platí nasledovné [3]

$$\delta \boldsymbol{\theta} = \left[\mathbf{S}^T \mathbf{W}_{\lambda} \mathbf{S} + \mathbf{W}_{\theta} \right]^{-1} \left\{ \mathbf{S}^T \mathbf{W}_{\lambda} \delta \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{W}_{\theta} \left\{ \boldsymbol{\theta}_k - \boldsymbol{\theta}_0 \right\} \right\}$$
(4)

V rovnici (4) $\delta\lambda$ predstavuje vektor rozdielu medzi *m* meranými a analytickými vlastnými číslami, $\delta\theta = \{\theta_k - \theta_0\}$ je vektor *n* odchýlok korigovaných parametrov θ , a **S** je [*mxn*] matica citlivosti vlastného čísla. V tomto článku bola pozornosť sústredená na problém, keď počet parametrov presahuje počet experimentálnych dát (*mxn*), teda existuje nekonečne veľa riešení $\delta\theta$. (konkrétne, *m* = 11 je celkový počet experimentálnych VT a VF pri korekcii a *n* = 18 (pri oboch prípadoch modelovania spoja)). Váhové matice, \mathbf{W}_{λ} a \mathbf{W}_{θ} , môžeme chápať ako vyjadrenie presnosti odhadu nameraných údajov, resp. odhadovanýh parametrov. Podľa [3] je tieto matice najvhodnejšie voliť ako prevrátené hodnoty odhadovaných odchýlok VČ resp. parametrov, umiestených na hlavnej diagonále. Správna voľba váhových matíc pritom ovplyvňuje rýchlosť konvergencie a tiež kvalitu výsledného matematického modelu, pričom absolútna veľkosť matice \mathbf{W}_{λ} nemá vo vzťahu (4) žiadný vplyv na výsledok. V tomto smere je dôležitejšia realtívna veľkosť \mathbf{W}_{λ} voči \mathbf{W}_{θ} , ktorá ovplyvňuje ako konvergenciu tak aj výslednu kvalitu modelu.

Priamo pri korekcii matematického modelu sme sa v tomto článku obmedzili len na použitie citlivosti vlastných čísel, pričom vlastné tvary zohrávajú dôležitú úlohu len v procese zoraďovania meraných a analytických VF (najme z dôvodov nízkej citlivosti VT na zmeny v parametroch a oveľa nižšej schopnosti presného určovania VT oproti VČ).

5. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Táto časť príspevku je venovaná priamo korekcii v predchádzjúcich kapitolách navrhnutých a popísaných modelov MS so skrutkovými spojmi, pri využití metódy citlivosti vlastného čísla, a taktiež vyhodnoteniu výsledkov získaných pre obidva navrhované modely.

Pružinový model skrutkového spoja,

Pri korekcii takto modelovanej mechanickej sústavy (pozri 2. kapitolu) sme použili vo 4. Kapitole uvedeny vzťah (4). Experimentálne získané vlastné frekvencie skutočnej MS [6] sú spolu s vlastnými frekvenciami počiatočného nekorigovaného matematického modelu uvedené v Tab.1. Vzájomné spárovanie VF uvedených v tejto tabuľke je zabezpečené pomocou kritéria modálnej vernosti (*MAC*), ktoré je čiselne uvedene v Tab.1 a graficky v priloženom Obr.5. Počiatočné hodnoty zvolených parametrov korigovaného modelu sú definované v Tab.2. Počas korekcie sme používali absolútne hodnoty vybraných VF a parametrov, pričom pri zostavovaní im prislúchajúcich váhových matíc W_{λ} a W_{θ} (pre úplnosť pozri kapitolu 4.) sme vychádzali z perdpokladu že VČ sú určené s presnosťou 0,25%, parametre tuhosti v ohybe (*EI_y*) s presnosťou 1%, tuhosť v krútení (*GI_x*) 6%, a pre tuhosť rotačných pružín (k_{qx} , k_{qy}) sme predpokladali odhad s presnosťou 100% [3].

<i>P.č.</i>	EMA	MKP	δf	MAC	
1.	35,91	35,50	1,12	99,88	
2.	41,54	40,92	1,46	99,85	
3.	67,54	64,66	4,52	99,71	
4.	109,94	109,67	0,23	99,82	
5.	158,60	153,98	2,95	99,65	
6.	204,16	214,76	5,19	96,70	
7.	280,76	292,19	4,07	96,31	
8.	285,04	279,80	1,83	98,96	
9.	294,68	306,38	3,97	98,45	
10.	416,58	427,16	2,54	98,44	
11.	456,58	452,80	0,82	98,47	

Tab.1 Porovnanie VF a VT nekorigovaného modelu a experimentu

Pozn.: Hodnoty VF v tabuľke sú uvedené v [Hz]. Hodnoty rozdielov VF δf sú uvedené v [%].



Obr.5 Porovnanie experimentálnych a analytických VT nekorigovaného matematického modelu pomocou *MAC* kritéria

<i>Parameter</i> θ_j	$EI_{y(1,\ldots,8)}[N.m^2]$	$GI_{x(1,\ldots,8)}[N.m^2]$	$k_{\varphi x} [N.m.rad^{-1}]$	$k_{\varphi y} [N.m.rad^{-1}]$
Hodnota parametra	151	230	$10x10^{5}$	$10x10^{4}$

Tab.2 Počiatočné hodnoty korigovaných parametrov pre pružinový model skrutkového spoja

Výsledky korekcie matematického modelu získané po šestnástich iteráciach sú uvedené v Tab.3. Z porovnania VF korigovaného modelu (Tab.3) so stavom MS pred korekciou (Tab.1) je vydieť že došlo k podstatnému vylepšeniu takmer všetkých

sledovaných VF, čo do určitej miery svedčí o správnej voľbe korigovaných parametrov. Hodnoty týchto parametrov získané po korekcii sú uvedené v Tab.4. Takýto spôsob modelovania MS (s využitím pružinového prvku pre popis skrutkového spoja) sa javí jako jedno z vhodných riešení aj z dôvodu vylepšenia sa zhody medzi experimentálnymi a korigovanými vlastnými tvarmi MS, čomu v Tab.3 a Obr.6 nasvedčujú aj hodnoty kritéria modálnej vernosti (*MAC*) použitého na ich vzájomné porovnanie. Z pohľadu možnosti využitia takto nakorigovaného matematického modelu v ďalšom procese riešenia problému zameraného na detekciu porúch v takýchto sústavach je tento ukazovateľ (*MAC*) dosť dôležitý pretože svedčí o pomerne slušnom priblížení sa matematického modelu skutočnému správaniu sa reálnej MS.

Aj napriek celkovému vylepšeniu matematického modelu sa niektoré VF aj naďalej odlišujú od skutočných, získaných experimentálne. Toto môže byť sposobené tým, že aj keď bolo dosiahnuté vylepšnie matematického modelu, takýto spôsob modelovania spoja pomocou pružinového elelemntu nedokáže zachytiť celkovú podstatu skrutkového spoja.

<i>P.č.</i>	EMA	MKP	δf	MAC
1.	35,91	35,28	1,74	99,88
2.	41,54	41,43	0,25	99,88
3.	67,54	67,06	0,71	99,74
4.	109,94	108,94	0,91	99,83
5.	158,60	158,08	0,33	99,73
6.	204,16	209,04	2,35	98,71
7.	280,76	280,29	0,17	98,47
8.	285,04	285,50	0,16	99,63
9.	294,68	296,09	0,47	98,62
10.	416,58	422,98	1,51	98,63
11.	456,58	458,87	0,49	98,38



- Tab.3 Porovnanie VF a VT korigovaného modelu a experimentu.
- Pozn.: Hodnoty VF sú uvedené v [Hz]. Hodnoty rozdielov VF δf sú uvedené v [%].
- Obr.6 Porovnanie experimentálnych a analytických VT korigovaného matematického modelu pomocou *MAC* kritéria

Parameter $EI_v [N.m^2]$	EI_{yl}	EI_{y2}	EI _{y3}	EI_{y4}	EI_{y5}	EI _{y6}	EI_{y7}	EI_{y8}
Hodnota parametra	149,59	149,72	132,66	132,65	148,69	148,42	133,36	133,19
$\begin{array}{c} Parameter \\ GI_x \left[N.m^2 \right] \end{array}$	GI_{xl}	GI_{x2}	GI_{x3}	GI_{x4}	GI_{x5}	GI _{x6}	GI_{x7}	GI_{x8}
Hodnota parametra	244,03	244,16	307,09	307,08	243,29	243,70	307,81	307,73
Parameter [N.m.rad ⁻¹]		k	φx		k_{qy}			
Hodnota parametra	1516239,45				132997,74			

Tab.4 Hodnoty korigovaných parametrov pre pružinový model skrutkového spoja po korekcii

Nosníkový model skrutkového spoja,

Základné predpoklady zavedené pri korekcii matematického modelu s pružinovým elementom spoja boli dodržané aj v prípade spôsobu definovania spoja prostredníctvom tzv. '*beam*' elementu. Konkrétne sa jedná najmä o spôsob stanovenia váhových matíc (určenie presnosti odhadu VČ a zvolených parametrov), ktorý sa až na parametre modelu spoja nezmenil (odhad parametra EI_{ys} a GI_{xs} (pozri poznámku pod Tab.6) predpokladáme s presnosťou 50%). Hodnoty VF pre nekorigovaný matematický model, experiment a ich vzájomné porovnanie je uvedené v Tab.5 a počiatočné hodnoty korigovaných parametrov sú v Tab.6. Miera zhody VT modelu a experimentu je v Tab.5 a Obr.7 vyjadrená kritériom modálnej vernosti (*MAC*).

<i>P.č.</i>	EMA	MKP	δf	MAC	
1.	35,91	35,48	1,18	99,88	
2.	41,54	41,01	1,28	99,85	(
3.	67,54	64,80	4,05	99,71	
4.	109,94	109,56	0,34	99,81	(
5.	158,60	153,51	3,20	99,64	
6.	204,16	206,09	0,59	99,26	(
7.	280,76	296,14	5,48	95,06	
8.	285,04	279,49	1,94	99,07	
9.	294,68	304,18	3,23	98,00	
10.	416,58	423,93	2,76	98,61	
11.	456,58	452,74	0,83	98,46	

- Tab.5 Porovnanie VF a VT nekorigovaného modelu a experimentu
- Pozn.: Hodnoty VF uvedených sú uvedené v [Hz]. Hodnoty rozdielov VF δf sú uvedené v [%].



Obr.8 Porovnanie experimentálnych a analytických VT nekorigovaného matematického modelu pomocou *MAC* kritéria

<i>Parameter</i> θ_i	$EI_{y(1,\ldots,8)}[N.m^2]$	$GI_{x(1,\ldots,8)}[N.m^2]$	EI_{ys} [N.m ²]	$GI_{xs}[N.m^2]$
Hodnota parametra	151	230	44877	288

Tab.6 Počiatočné hodnoty korigovaných parametrov pre nosníkový model skrutkového spoja Pozn.: EI_{ys} a GI_{xs} predstavuju parametre nosníkového prvku v mieste skrutkového spoja

Výsledky korekcie pri použití nosníkového prvku sú až na niektoré rozdiely zhodné s tými ktoré sme získali pri pružinovom modele spoja. Spomenuté rozdiely sa týkajú napríklad v poradí šiestej VF (202,84 Hz), ktorá sa ukázala jako pomerne citlivá na zmenu parametra GIxs, čo je dôkazom rozdielu v spôsobe nazerania na problém modelovania a korekcie skrutkovanej MS definovanej v 1. kapitole oproti predchádzajúcemu prípadu použitého pružinového prvku. Naopak. ak sme v predchádzajúcom prípade dosiahli pomerne vysokú zhodu medzi VT modelu a experimentu, v tomto prípade došlo k rapídnemu zhoršeniu korelácie medzi 7., 8. a 9. meraným a korigovaným VT MS, čím sa do istej miery narušila fyzikálna podstata MKP modelu a problém korekcie sa z roviny fyzikálnej výrazne posunul do roviny matematickej. Tento stav, bol najprvdepodobnejšie vyvolaný výraznejšími rozdielmi v hodnotách korigovaných parametrov ktoré prináležia jednej súvislej časti MS (napr. rozdiely medzi parametrami torznej tuhosti GI_{x1} a GI_{x2} , resp. GI_{x5} a GI_{x6} (pozri Tab.8 a

Obr. 4)). Tomuto sa môžeme vyhnúť napríklad znížením počtu parametrov v korigovanej MS (každej tyči (Obr.1a) bude prináležať jeden parameter, alebo zavedením pomocnej regularizačnej podmienky, ktorá by do určitej miery kontrolovala vzájomnú zmenu hodnôt medzi jednotlivými korigovanými parametrami). Zavedenie takejto regularizačnej podmienky by potom mohlo prispieť aj k zlepšeniu výsledného matematického modelu.

Z pohľadu problému detekcie porúch v MS môžeme skonštatovať že sice došlo k vylepšeniu VF sledovaného modelu MS no súčastne sa zhoršila miera zhody medzi VT matematického modelu a skutočnej MS, čo sťažuje možnosť použiťia takéhoto modelu v procese detekcie porúch. V Tab.8 sú kôli úplnosti ešte uvedené aj konečné hodnoty korigovaných parametrov matematického modelu.

<i>P.č.</i>	EMA	MKP	δf	MAC
1.	35,91	35,28	1,74	99,88
2.	41,54	41,43	0,25	99,88
3.	67,54	67,06	0,71	99,74
4.	109,94	108,94	0,91	99,83
5.	158,60	158,08	0,33	99,73
6.	204,16	209,04	2,35	98,71
7.	280,76	280,29	0,17	98,47
8.	285,04	285,50	0,16	99,63
9.	294,68	296,09	0,47	98,62
10.	416,58	422,98	1,51	98,63
11.	456,58	458,87	0,49	98,38



Tab.7 Porovnanie VF a VT korigovaného modelu a experimentu.

Pozn.: Hodnoty VF sú uvedené v [Hz]. Hodnoty rozdielov VF δf sú uvedené v [%].



Parameter $EI_{y} [N.m^{2}]$	EI_{yl}	EI_{y2}	EI_{y3}	EI_{y4}	EI_{y5}	EI_{y6}	EI_{y7}	EI_{y8}
Hodnota parametra	154,53	154,54	139,34	139,94	146,18	146,89	134,37	132,96
Parameter $GI_x [N.m^2]$	GI_{xl}	GI_{x2}	GI_{x3}	GI_{x4}	GI_{x5}	GI_{x6}	GI_{x7}	GI_{x8}
Hodnota parametra	242,51	239,78	294,15	294,68	237,76	241,09	295,50	295,02
Parameter [N.m ²]		E	I _{ys}		GI_{xs}			
Hodnota parametra	46203,39				330,86			

Tab.8 Hodnoty korigovaných parametrov pre nosníkový model skrutkového spoja po korekcii

5. ZÁVER

Použitím fyzikálnych parametrov opísaných v 3. kapitole sme korigovali mechanickú sústavu obsahujúcu skrutkový spoj, pričom samotné skrutkové spojenie bolo modelované dvoma rôznymi spôsobmi. Najprv sme pre potrebu modelovania spomínaného skrutkového spoja použili pružinový tzv.'*spring join*' element a v druhom prípade trojrozmerný nosníkový tzv. '*beam*' element.

Použitie pružinového elementu pri modelovaní skrutkového spoja sa ukázalo ako pomerne výhodné, aj keď samotný pružinový prvok nedokázal úplne presne zachytiť podstatu definovaného spoja. Výsledky získané pri tomto prístupe boli pomerne uspokojivé pričom s ohľadom na už uvedenú skutočnosť týkajúcu sa použitia pružiny pri skrutkovom spoji sa dosiahla aj pomerne slušná miera zhody medzi modelom a experimentom vyjadrená pomocou kritéria modálnej vernosti. Takto získané výsledky budú ďalej použité pri riešení problému detekcie poškodenia v miestach skrutkového spoja.

V prípade nosníkového prvku sa potvrdilo to že poskytuje iný spôsob pohľadu na problém správania sa MS popísanej v 1. kapitola v oblasti skrutkového spoja, pričom samotná parametrizácia takéhoto modelu umožnila oproti predchádzajúcemu prípadu presnejšie stanovenie niektorých VF matematického modelu. Aj napriek tomu však dosiahnutá zhoda medzi takýmto modelom a skutočnosťou nebola uspokojujúca. Možné riešenie tohoto nepriaznivého stavu spočíva napríklad vo vhodnejšej voľbe parametrov, stanovení prijateľnej regularizačnej podmienky v procese korekcie, prípadne vo využití samotných VT MS na korekciu matematického modelu.

6. POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Balmès E., Structural Dynamics Toolbox, User's Guide, Version 4.1, 2001
- [2] Ewins D.J., Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press, Letchworth, 1984
- [3] Friswell M.I., Mottershead J.E., Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995
- [4] Grafe H., Model Updating of Large Structural Dynamics Models Using Measured Responce Function, Department of Mechanical Engineering, Dynamics Section, London, South Kensington, 1998
- [5] Horton B., Gurgenci H., Veidit 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
- [6] Titurus B., Starek L., Čižmár K., Parametrizácia v Detekcii Poškodenia Mechanickej Sústavy so Skrutkovými Spojmi, Časť I. Experiment, v: Zborník referátov III. časť, Strojné Inžinierstvo 2001, Bratislava, 2001, 614-619