

Ján HAŠKO

## MODÁLNA ANALÝZA S PRIDANÝMI HMOTAMI

*Modal analysis with added masses*

### Annotation

Modern methods of acoustic optimization have become an integral part of the process of new vehicles and their components development. This contribution is focused mainly on the verification of the modified EMA procedure, when it is possible to verify the FEM model of the constrained system using the EMA of the free system with appropriately added masses. Thus, it is possible to obtain a verified FEM model for the simulation of the fixed steering system without the need of the verification measurement of thus mounted system. This would require the production of expensive, dimensional fixtures and prolong the development phase of the system too. After further verification measurements, the suggested procedure could probably be implemented in ZF standard procedures and thus contribute to streamlining our processes as well as further improvement of the quality and competitiveness of our products.

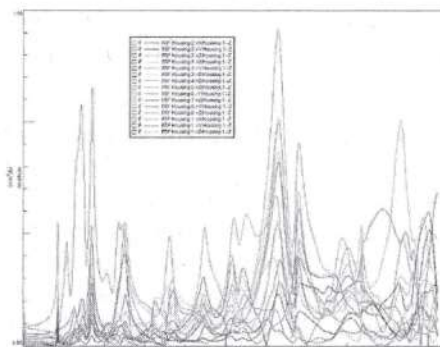
**Key words:** modified EMA procedure, FEM model verification

### ÚVOD

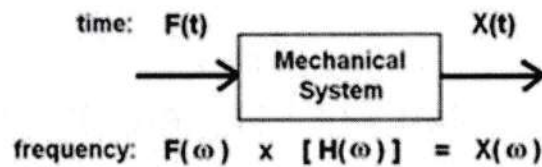
Riešenie akustiky vozidiel sa stalo neoddeliteľnou súčasťou vývojových etáp nových automobilov. Tieto postupy zahŕňajú ako rôzne „multiphysics“ simulácie (ako napr. štruktúrne, akustické, tepelné, elektromagnetické, prúdenia a pod.), tak i moderné experimentálne metódy (EMA, TPA, PCA, ODS a pod.) aplikované v rámci prototypových etáp vývoja vozidiel alebo ich komponentov. V rámci tohto príspevku by som sa chcel zamerať najmä na modifikovaný postup experimentálnej modálnej analýzy tzv. testovanie s pridanými hmotami, ktorý plánujeme využívať pri vývoji elektromechanických systémov riadenia a ich zabudovaní do vozidiel.

## 1. EXPERIMENTÁLNA MODÁLNA ANALÝZA (EMA)

EMA je proces extrakcie dynamických charakteristík vibračného systému (vlastných frekvencií, tlmenia, tvarov kmitania) na základe experimentálnych prenosových funkcií obr.1. Prenosová funkcia je miera odozvy systému na určitý vstup. Pri tomto druhu analýzy je vstupom obyčajne silové pôsobenie a meraná odozva je pohyb, buď vo forme zrýchlenia, rýchlosti alebo posunutia obr. 2.



Obr.1 Experimentálne prenosové funkcie analyzovaného systému riadenia



Obr. 2 Prenosová funkcia (FRF)

Modálne dáta nám pomáhajú pri dizajne jednotlivých komponentov systémov riadenia, s cieľom správneho modálneho naladenia vlastného systému (t. j. vylúčení rezonancií z prevádzkového rozsahu), príp. i ďalších súvisiacich komponentov vozidla. To je spojené nielen so znížením hluku a vibrácií ale i s redukciou prídavných dynamických zaťažení a teda i zlepšením únavových charakteristík jednotlivých komponentov.

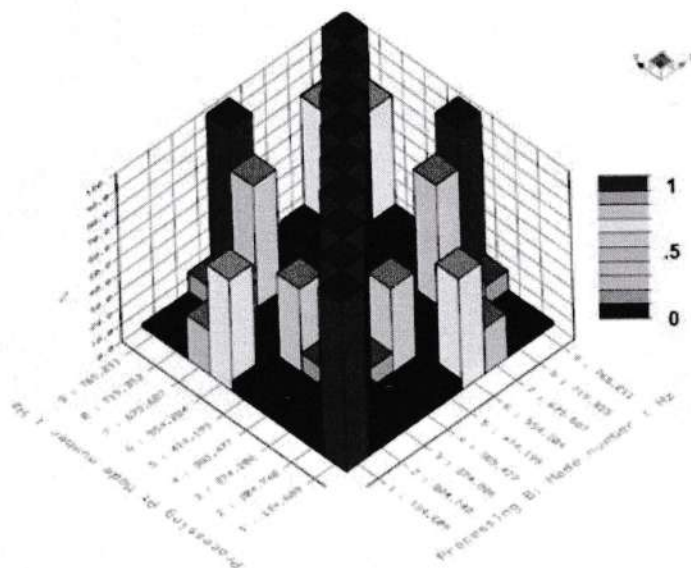
Dáta z experimentálnej modálnej analýzy používame i pri overovaní MKP modelov a tento príspevok je venovaný práve tejto problematike. Predmetom článku je najmä popis overenia modifikovaného postupu EMA, kedy je pomocou EMA voľného systému s vhodne pridanými hmotami možné overiť MKP model votknutého systému [1]. Najprv je využitím EMA odladený voľný MKP model s rovnakými pridanými hmotami v miestach montážnych bodov. Následne je potom možné, po odstránení pridaných hmôt a zmene okrajových podmienok, použiť tento model na simulácie systému s jeho reálnym uložením. Týmto postupom teda získame overený MKP model na simulácie upevneného systému riadenia, bez potreby overovacieho merania takto uloženého systému, čo by vyžadovalo výrobu mohutných, drahých prípravkov pre rôzne modifikácie systému. Tým by sa predĺžil i čas potrebný na vývoj týchto systémov a teda uvedenie výrobku na trh.

## 2. POSTUP URČENIA VEĽKOSTI VHODNÝCH PRIDANÝCH HMÔT

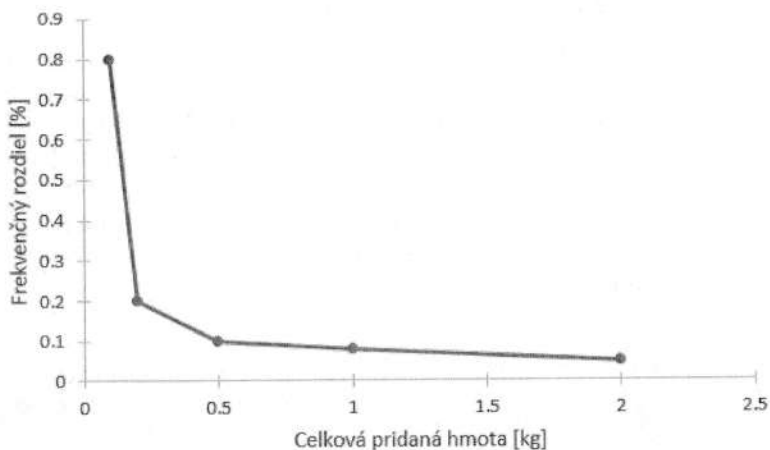
Cieľom je určiť veľkosť pridaných hmôt, ktoré je potrebné pridať do montážnych bodov kompletného systému riadenia zaveseného na pružných lanách tak, aby sa získali uzly kmitania v týchto miestach pre čo najväčší počet vlastných frekvencií (najmä najnižších vo zvislom smere). Dominantné budenie systému, pri jazde v priamom smere, je budenie zotrvačnými silami v súvislosti s nerovnosťami vozovky, teda prevažne vo zvislom smere.

Bol overovaný nasledovný postup:

- príprava MKP modelu s votknutiami v miestach montážnych bodov. Numerická modálna analýza - výpočet vlastných frekvencií a tvarov kmitania,
- príprava voľného MKP modelu pre overenie veľkosti pridaných hmôt,
- pridanie bodových hmotností do montážnych bodov voľného MKP modelu, v pomere reakčných síl v súvislosti s hmotnosťou vlastného systému (viď. zdôvodnenie uvedené ďalej). Numerická modálna analýza - výpočet vlastných frekvencií a tvarov kmitania – porovnanie s výsledkami pre MKP model s votknutiami,
- opakovanie analýzy pre postupné zvyšovanie veľkosti bodových hmôt v montážnych miestach voľného MKP modelu (s vhodným inkrementom, vždy v pomere reakčných síl) až po dosiahnutie čo najlepšej zhody (z hľadiska vlastných frekvencií a tvarov kmitania vo vyžadovanom frekvenčnom rozsahu) s výsledkami pre MKP model votknutého systému - využitie MAC kritéria podľa obr. 3. Vplyv veľkosti pridaných hmôt mal, z hľadiska rozdielov medzi príslušnými vlastnými frekvenciami voľného a votknutého MKP modelu, zväčša charakter podľa lomenej čiary na obr. 4. Tento postup (tzv. analýza konvergencie) je doporučovaný i z hľadiska posúdenia vhodnosti použitia tejto metódy pre určité komponenty [2], pretože metóda s pridanými hmotami nie je všeobecne použiteľná.

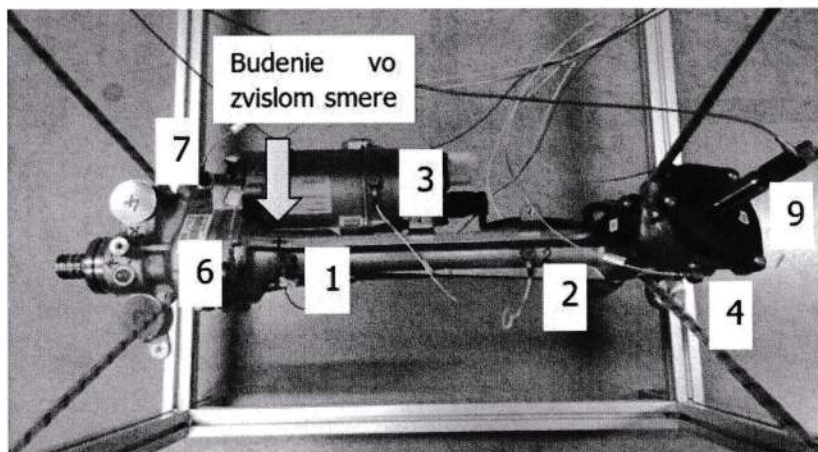


Obr. 3 MAC pre dokonalú zhodu MKP modelov z hľadiska vlastných frekvencií



Obr. 4 Analýza konvergenzie (pri zobrazenom priebehu je skúmaná metóda použiteľná)

- takto získané hmotnosti boli potom pridané (vo forme malých oceľových diskov) do montážnych bodov analyzovaného reálneho systému, pri EMA voľného systému obr. 5, s cieľom získať korektný voľný MKP model s rovnakými bodovými hmotnosťami (modifikáciami tohto MKP modelu prostredníctvom úpravy modulu pružnosti, väzieb a pod.). Pri tom bolo potrebné vziať do úvahy, že numerická modálna analýza počíta vlastné frekvencie pre netlmený systém, na rozdiel od EMA, kde je zohľadnené i reálne tlmenie (teda je tam potrebné očakávať určitý posun vlastných frekvencií získaných výpočtom a experimentom).

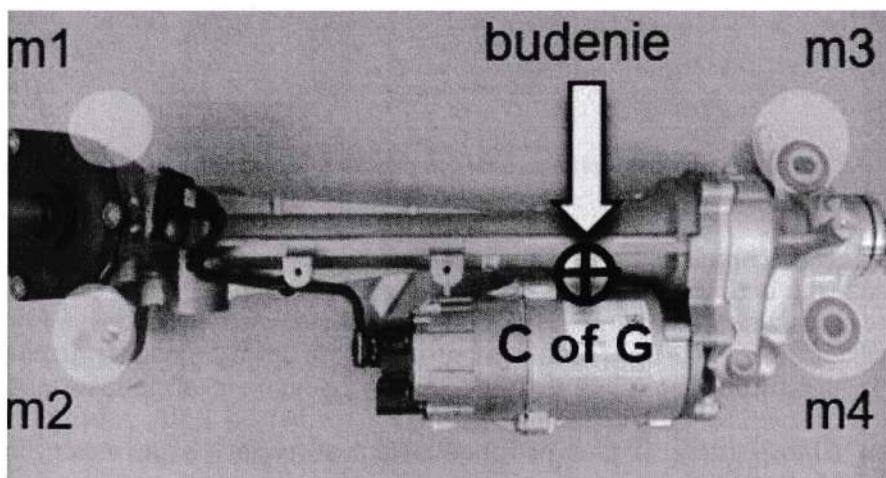


Obr. 5 Usporiadanie EMA pre analyzovaný systém s pridanými hmotami

### 3. ROZDELENIE PRIDANÝCH HMÔT DO MONTÁŽNYCH BODOV

Rozdelenie pridaných hmôt v pomere reakčných síl, v súvislosti s hmotnosťou vlastného systému, vychádza z nasledovnej úvahy:

- uvedené rozdelenie týchto hmôt umožňuje zachovanie polohy ťažiska systému pri postupnom zvyšovaní veľkosti pridaných hmôt
- systém bude pri EMA budený modálnym kladivom vo zvislom smere, približne v blízkosti ťažiska systému obr. 6. Ak sú pridané hmoty v montážnych bodoch v pomere statických reakčných síl, je možné očakávať (ako odozvu na Dirackov impulz) vo všetkých montážnych bodoch približne rovnaké zrýchlenia (za predpokladu, že pružné lano na strane bližšej ku ťažisku má vyššiu tuhosť - pre zaistenie vodorovnej polohy meraného systému). Ak sú tieto pridané hmotnosti dostatočne veľké, vibrácie systému, najmä ako pružného telesa, budú v týchto miestach konvergovať k 0, teda tu vzniknú uzly kmitania.



Obr. 6 Poloha ťažiska analyzovaného systému s vyznačením miest pre pridané hmoty

## ZÁVER

Uvedená metóda nie je nová i keď je zatiaľ málo rozšírená. Vznikla a využíva sa najmä v leteckej a kozmickej technike. Naznačený postup by pravdepodobne po ďalších overovacích meraniach mohol byť implementovaný i do štandardných postupov firmy ZF, pre získanie overeného MKP modelu systému riadenia napr. s uložením do pomocného rámu. Využitie vyššie uvedenej experimentálnej metódy by tak mohlo priniesť ďalšie zefektívnenie našich procesov a prispieť tiež k ďalšiemu zvýšeniu kvality a konkurencieschopnosti našich produktov.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] TINKER, M. L.: Hybrid residual flexibility/mass-additive method for structural dynamic testing. Technical memorandum NASA/TM-2003- 212343, March 2003, MSFC, Alabama 35812.
- [2] CHANDLER, K., CALVERT, B.: A Nastran DMAP procedure for deriving analytical constrained modes of vibration from free-free mass additive test results. Proceedings of IMAC XI, Kissimmee, FL, 710-716, February 1993.

*Ďakujem vedeniu spoločnosti ZF Active Safety Slovakia s. r. o. v Novom Meste nad Váhom, že mi umožnilo účasť a prezentáciu interných materiálov spoločnosti na tomto podujatí.*

### **Kontaktná adresa:**

Ing. **Ján Haško**, PhD., Konzultant /Špecialista pre technickú diagnostiku, Oddelenie inžinieringu **ZF Active Safety Slovakia s.r.o.** Trenčianska ulica 2571/16, 915 01 Nové Mesto nad Váhom  
e-mail: [jan.hasko@zf.com](mailto:jan.hasko@zf.com), tel.: +421911022475