

DYNAMICKÝ EXPERIMENT NA SADĚ DŘEVĚNÝCH KONZOLOVÝCH NOSNÍKŮ

D. Lehký¹ a P. Frantík²

Abstract

Proposed paper describes results of dynamic experimental testing of a set of cantilever beams made of timber. Presented experimental work is part of the project which aim is development of methodology for damage identification of dynamically loaded structures.

Klíčová slova

Dynamický experiment, vlastní frekvence, vlastní tvary kmitu, spektrální analýza

1 ÚVOD

Součástí projektu zabývajícího se vývojem metodiky pro identifikaci poškození dynamicky namáhaných konstrukcí je i experimentální dynamické měření za účelem jejího komplexního ověření. Příspěvek nepřímo navazuje na numerickou studii vlivu místního snížení ohybové tuhosti konzolového nosníku na míru změny jeho vlastních frekvencí [2] a podobnou studii provedenou na mostě Z24 ve Švýcarsku [3].

Samotný vývoj metodiky identifikace poškození je motivován požadavky na zjištění aktuálního stavu v souvislosti s údržbou mostů a ověřením jejich životnosti. Za tímto účelem se instalují rozsáhlé monitorovací systémy, s jejichž pomocí je získávána dynamická odezva konstrukce ve formě časových řad (zrychlení, rychlosti apod.). Z nich bývají následně stanoveny tzv. modální vlastnosti (vlastní tvary a jim odpovídající vlastní frekvence), tlumící charakteristiky a v případě znalosti referenčního stavu také srovnávací kritéria MAC, FRAC, COMAC apod. (viz např. [4]). Snahou odborníků je využití takto získaných informací z odezvy konstrukce pro lokalizaci poškození a následné stanovení zbytkové životnosti. Předpokládá se, že lokální poškození konstrukce se projeví měřitelnou změnou výše zmíněných parametrů. Porovnáním s neporušeným stavem lze poté zpětně detekovat místa porušení. Uvedený postup spadá do oblasti pokročilého nedestruktivního testování.

¹ Ing. David Lehký, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, FAST, VUT v Brně, Veveří 331/95, 60200 Brno, Česká republika, telefon: +420 541 147 376, e-mail: lehky.d@fce.vutbr.cz.

² Ing. Petr Frantík, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, FAST, VUT v Brně, Veveří 331/95, 60200 Brno, Česká republika, telefon: +420 541 147 376, e-mail: frantik.p@fce.vutbr.cz.

2 METODIKA MĚŘENÍ

2.1 Testovací konfigurace

Dynamický experiment byl proveden na sadě 10 vzorků z jasanového dřeva. Testovací konfigurací byl konzolový nosník. Rozměry vzorků byly následující: délka = 1 m, šířka = 30 mm a výška 7 mm. Vetknutí bylo realizováno dostatečně nepoddajným uchycením na délce 100 mm, výsledná délka konzolového nosníku pak činila 0,9 m.

Měření bylo prováděno pomocí jednoho akcelerometru Brüel & Kjær 4508-B-001 připojeného k analyzátoru Brüel & Kjær 3560-B-140, viz obrázek 1. Zaznamenávána byla časová řada zrychlení pomocí aplikace Brüel & Kjær Time Recorder. Hmotnost přidané hmoty dané připevněným akcelerometrem byla stanovena 5 g (vlastní akcelerometr + svorka + část kabelu). Délka záznamu každé časové řady byla přibližně 10 sekund z toho přibližně 2 sekundy připadly na klidový stav před zatížením. Snímání bylo provedeno s časovým krokem přibližně $2,44141 \cdot 10^{-4}$ s, tj. 4096 vzorků za sekundu. Záznam kmitání byl odděleně proveden na 6 místech nosníku vzdálených od sebe 15 cm počínaje volným koncem nosníku. Na obrázku 1 je vyobrazena testovací konfigurace a realizace vetknutí nosníku.

Zatížení bylo provedeno s ohledem na požadavek velké míry opakovatelnosti pádem plastové kuličky o průměru 6 mm a váze 0,25 g z výšky přibližně 32 cm na volný okraj testovaného nosníku tak, aby došlo k jedinému střetnutí. Tento způsob měření a zatížení byl navržen s ohledem na předpoklad možného nelineárního kmitání nosníku vlivem poškození.



Obr. 1 Dřevěný konzolový nosník: a) testovací konfigurace, b) realizace vetknutí

2.2 Postup měření a zpracování dat

Před samotným dynamickým testováním bylo provedeno přeměření a zvážení všech vzorků. S pomocí naměřených frekvencí byl stanoven modul pružnosti E každého vzorku (viz tabulka 1) pomocí následujícího vztahu:

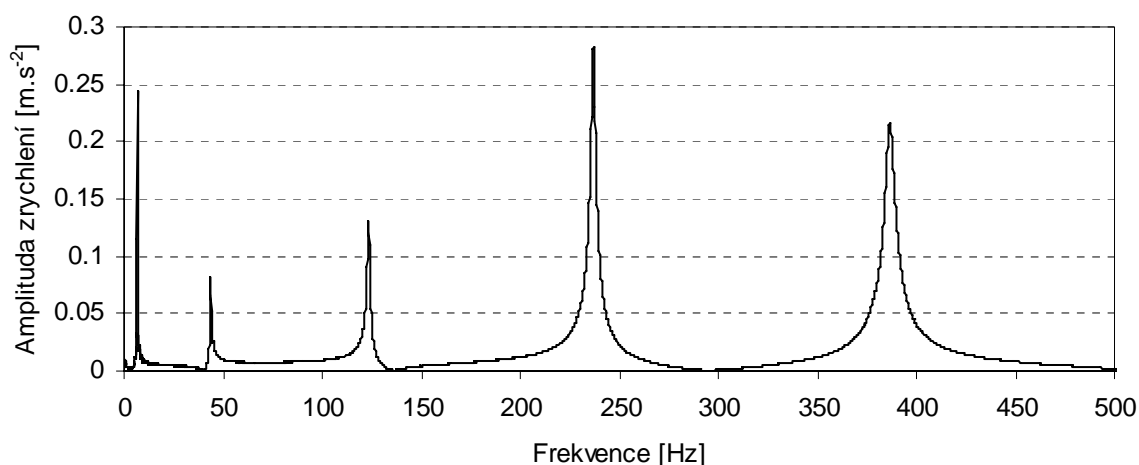
$$E = \frac{4 f_1^2 m l^3 \pi^2}{1,875^4 I}, \quad (1)$$

kde f_1 je první vlastní frekvence, m je hmotnost nosníku, l je délka nosníku a I je moment setrvačnosti průřezu. Rovnice (1) vznikla úpravou vztahu pro teoretický výpočet vlastních frekvencí kmitání konzolového nosníku konstantního průřezu, za předpokladu zanedbání vlivu přetvárné práce posouvajících sil a rotační setrvačnosti (Bernoulliova-Eulerova teorie, viz [1]):

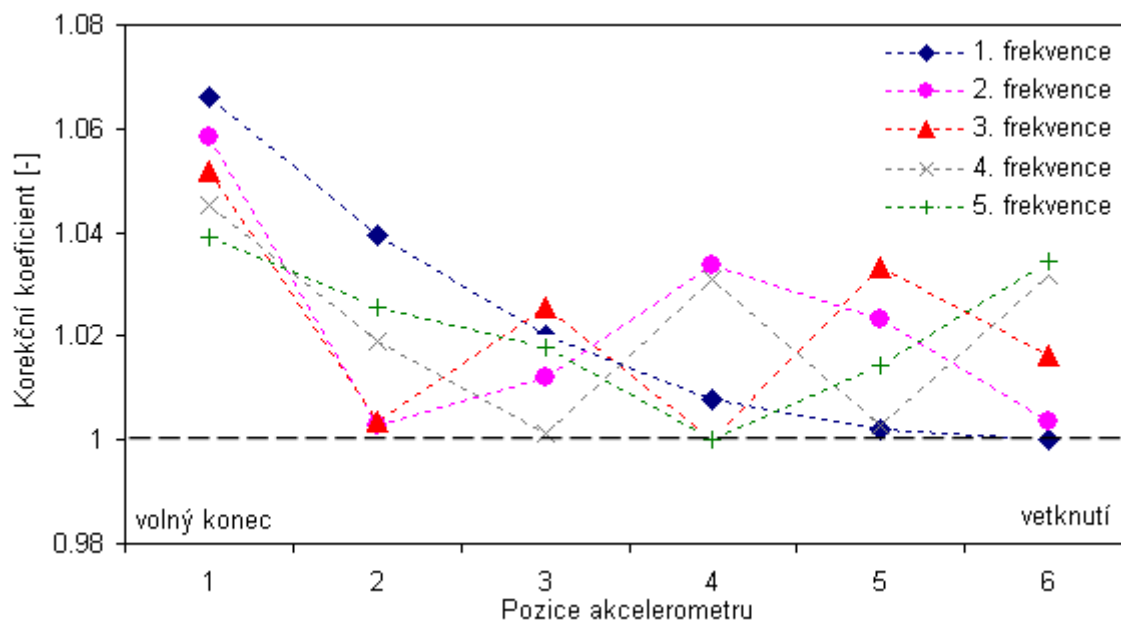
$$f_m = \frac{\lambda_m^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{ml^3}}, \quad \cos \lambda_m \cdot \cosh \lambda_m = -1, \quad (2)$$

kde λ_m je řešení uvedené funkce, přičemž m je číslo (pořadí) vlastního tvaru s příslušnou vlastní frekvencí f_m . Je-li $\lambda_m < \lambda_{m+1}$, pak $f_m < f_{m+1}$ pro každé celé m . V našem případě byla použita první vlastní frekvence f_1 a první vlastní číslo $\lambda_1 = 1,875$.

Se záznamy časových řad byla provedena spektrální analýza pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) a získány hodnoty vlastních frekvencí (obrázek 2) a vlastní tvary kmitu (obrázek 9). Vzhledem k reaktivně nízké tuhosti nosníků vůči přidané hmotě akcelerometru byla provedena korekce vlastních frekvencí v závislosti na poloze akcelerometru a přepočteno na nezatížený nosník. Za tímto účelem byla využita numerická modální analýza v programu SOFiSTiK [5]. Na základě změřené hmotnosti a tuhosti byly získány očekávané vlastní tvary a vlastní frekvence. Následně byla, v souladu se skutečným měřením, postupně do jednotlivých míst na nosníku přidána koncentrovaná kmitající hmota (připojený akcelerometr) a sledovány změny frekvencí. Na základě těchto výpočtů byly vytvořeny korekční křivky (obrázek 3) a naměřené frekvence přepočteny na nosník nezatížený akcelerometrem. Tvar korekčních křivek odpovídá vlastním tvarům kmitu.



Obr. 2 Frekvenční spektrum pro vzorek c01 při poloze snímače 15 cm od volného konce



Obr. 3 Korekční křivky pro jednotlivé frekvence

3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V tabulce 1 jsou uvedeny statistiky hmotnosti a modulu pružnosti ze všech deseti vzorků. Rozdíl ve hmotnostech nebyl příliš výrazný (2,7 %), proměnlivost modulů pružnosti již byla výraznější (14,6 %).

Veličina	Aritmetický průměr	Variační koeficient
Hmotnost [g]	158,3	0,027
Modul pružnosti [GPa]	15,754	0,146

Tab. 1 Statistika hmotnosti a modulu pružnosti ze všech vzorků

Na obrázcích 4 až 8 jsou vykresleny hodnoty vlastních frekvencí pro jednotlivé vzorky spolu s hodnotou aritmetického průměru ze všech vzorků. Hodnota pro každý vzorek je stanovena jako aritmetický průměr z šesti měření při různých polohách akcelerometru a po aplikaci výše zmíněné korekce vlivu tíhy akcelerometru. Vyjimku tvoří třetí a pátá frekvence, kde bylo použito měření pouze z pěti míst z důvodu blízkosti uzlu odpovídajících tvarů k poloze snímače č.4 (60 cm od volného okraje). Změřené špičky frekvencí zde nebyly výrazné a tak stanovení odpovídající frekvence bylo problematické nebo nemožné. U každého vzorku je rovněž vynesena hranice jeho maximální a minimální frekvence. Variační koeficient se v průměru pohybuje kolem 0,4 %. Před provedením korekce, kdy byly frekvence ovlivněny tíhou akcelerometru, měl variační koeficient průměrně hodnotu 2 %. Statistické vyhodnocení výsledků měření všech deseti vzorků je uvedeno v tabulce 2. Variační koeficient je u všech pěti sledovaných frekvencí přibližně 6 %.

V tabulke 3 je provedeno srovnání experimentálně získaných hodnot vlastních frekvencí (aritmetický průměr) s analytickým řešením (2), viz [1]. Parametry analytického řešení byly získány aproximací průměrných hodnot naměřených frekvencí (tabulka 2) metodou nejmenších čtverců.

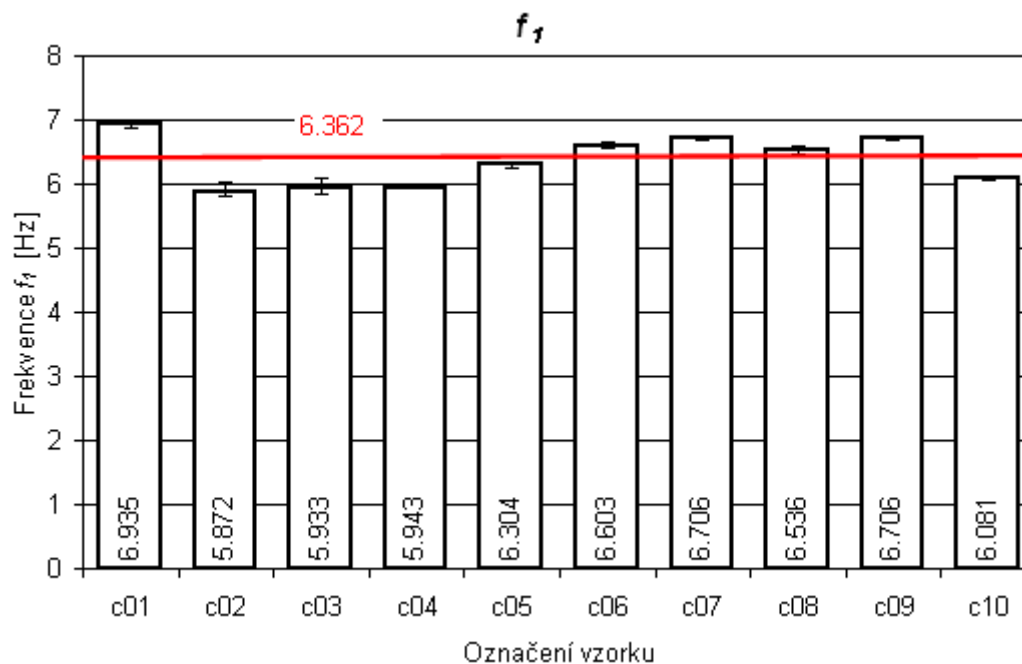
Díky standardizaci měření a zatěžování bylo možné přibližně stanovit i vlastní tvary kmitu, jako znaménkově upravené amplitudy zrychlení podél délky nosníku. Na obrázku 9 je pro příklad vykresleno prvních pět takto získaných tvarů vzorku c01.

Frekvence [Hz]	Aritmetický průměr	Variační koeficient
f_1	6,362	0,058
f_2	39,682	0,057
f_3	111,658	0,056
f_4	217,922	0,061
f_5	358,321	0,060

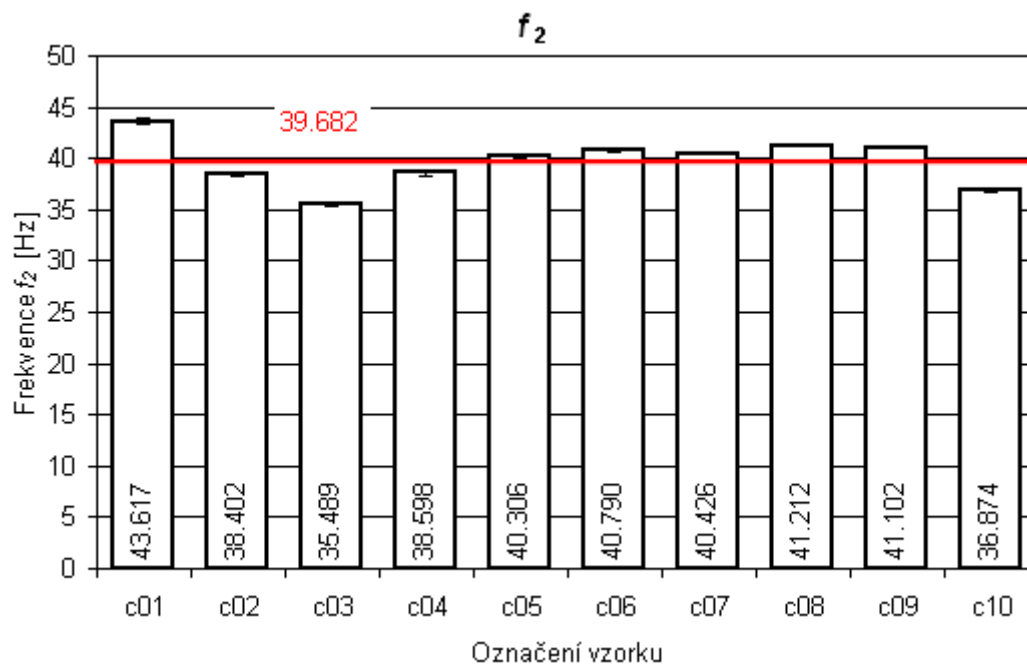
Tab. 2 Statistiky jednotlivých frekvencí ze všech vzorků

Frekvence [Hz]	Experiment	Analytické řešení	Odchylka [%]
f_1	6,362	6,339	0,4
f_2	39,682	39,728	0,1
f_3	111,658	111,251	0,4
f_4	217,922	218,011	0,1
f_5	358,321	360,350	0,6

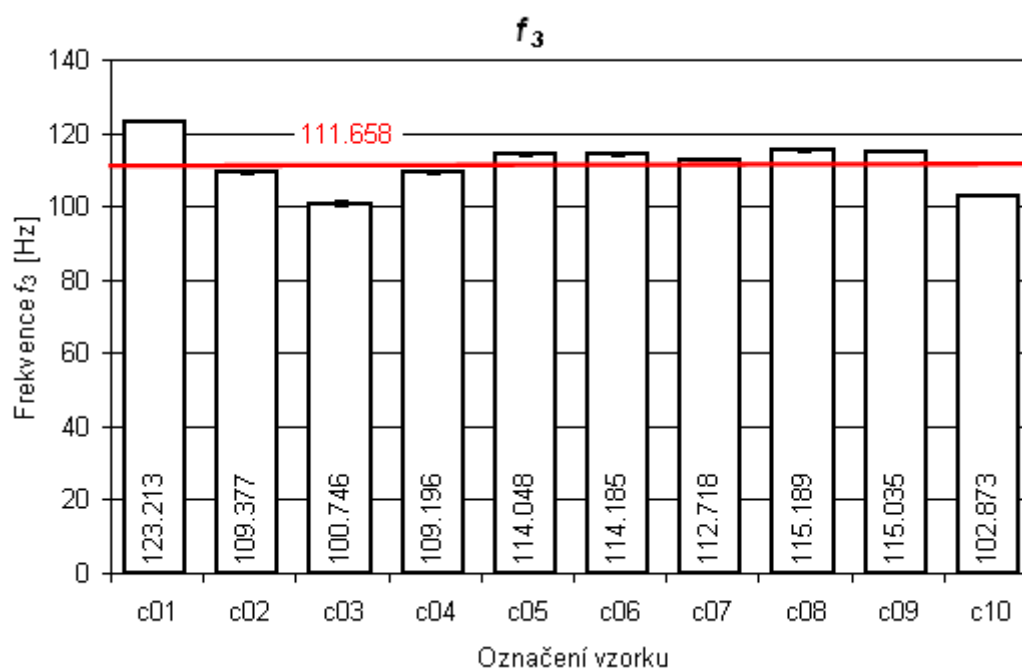
Tab. 3 Srovnání experimentálních výsledků s analytickým řešením



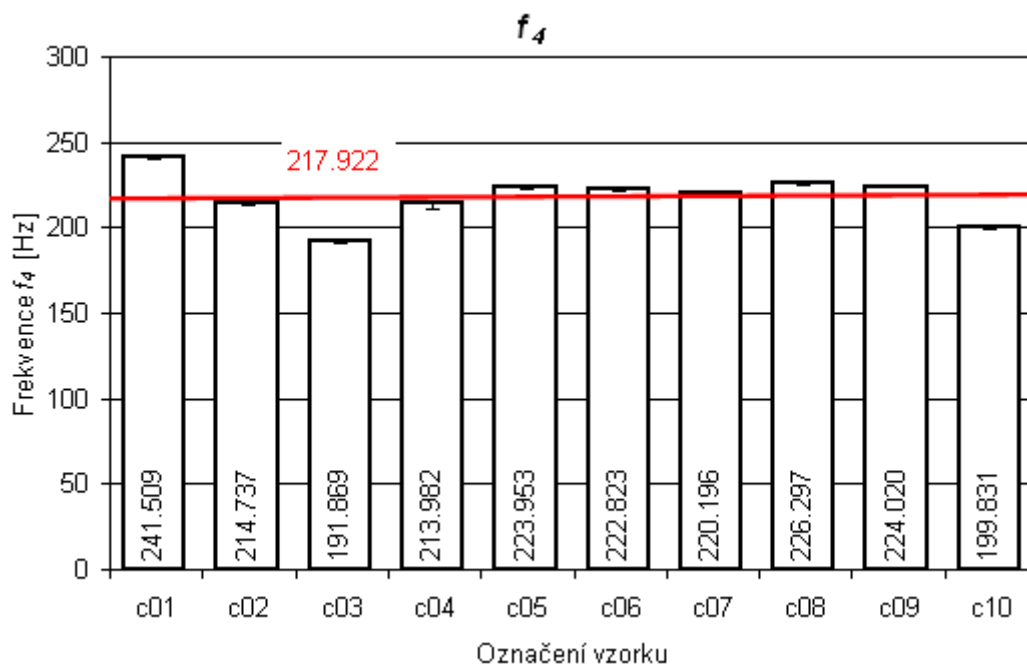
Obr. 4 Hodnoty prvních vlastních frekvencí pro jednotlivé vzorky



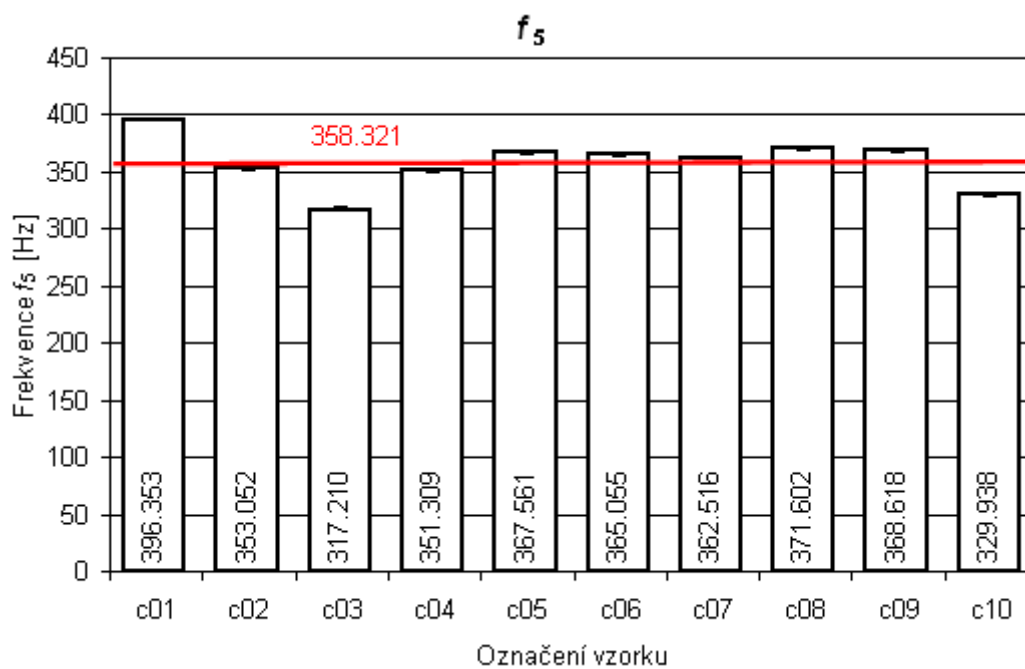
Obr. 5 Hodnoty druhých vlastních frekvencí pro jednotlivé vzorky



Obr. 6 Hodnoty třetích vlastních frekvencí pro jednotlivé vzorky



Obr. 7 Hodnoty čtvrtých vlastních frekvencí pro jednotlivé vzorky

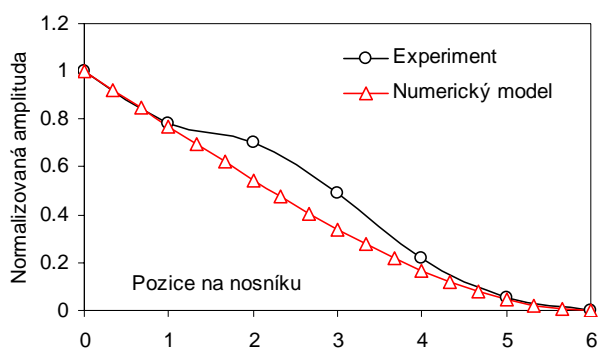


Obr. 8 Hodnoty pátých vlastních frekvencí pro jednotlivé vzorky

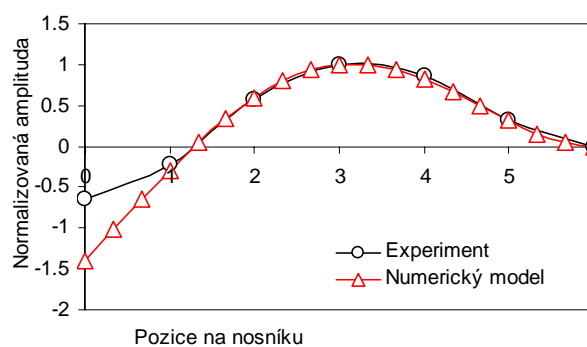
4 NUMERICKÝ MODEL

Pro účely verifikace naměřených dat, výše zmíněnou korekci vlivu tíhy akcelerometru na výsledné modální vlastnosti a pro účely následné identifikace poškození (která není součástí tohoto příspěvku) byl vytvořen numerický model v programu SOFiSTiK [5]. Jedná se o prostorový prutový model s šesti stupni volnosti v každém uzlu. Jelikož bylo v případě experimentálního měření zatěžováno pouze ve svislé rovině, byly z numerického modelu extrahovány ohybové vlastní tvary ve svislé rovině. Na obrázku 9 jsou vyobrazeny jednotlivé tvary nosníku stanovené numerickým výpočtem a porovnány s experimentálně získanými tvary pro vzorek c01.

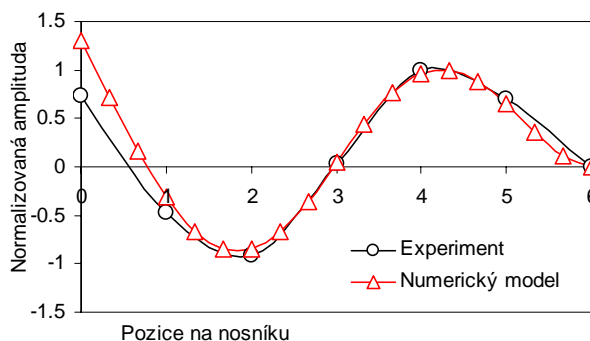
1. vlastní tvar



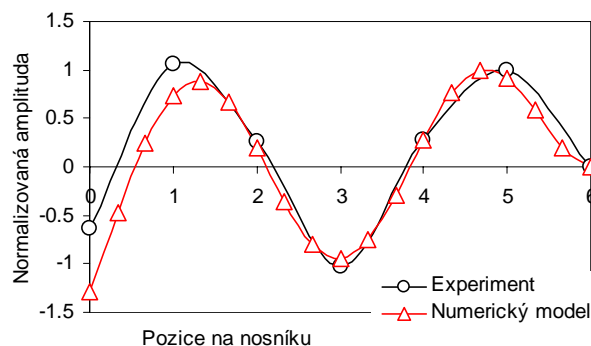
2. vlastní tvar



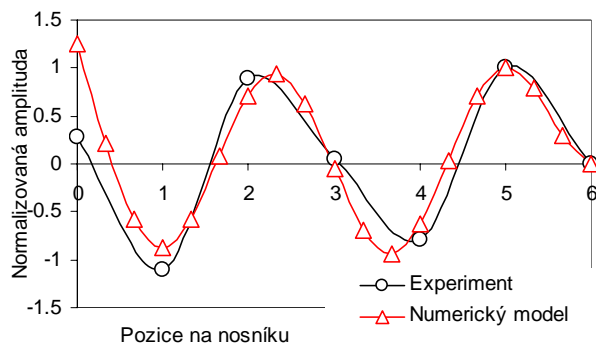
3. vlastní tvar



4. vlastní tvar



5. vlastní tvar



Obr. 9 Srovnání prvních pěti experimentálně a numericky získaných vlastních tvarů na vzorku c01

5 ZÁVĚR

V příspěvku je prezentován postup a výsledky měření dynamického experimentu. Správnost výsledků byla ověřena analytickými i numerickými výpočty (vlastní frekvence a tvary). Důležitým krokem ke správnému stanovení vlastních frekvencí byla redukce vlivu tíhy akcelerometru, jak bylo ukázáno v části 2.2. Rozptyl hodnot frekvencí z měření deseti vzorků není příliš velký (cca 6 %), o poznání větší je u modulů pružnosti dřeva (cca 15 %). Frekvenční spektra získaná z jednotlivých měření jsou velmi výrazná a velmi dobře se shodují s analytickým i numerickým řešením. Výsledky experimentů ukázaly, že díky standardizaci zatěžování je možné získat vlastní frekvence a tvary měření pomocí jediného snímače. V případě vlastních tvarů by však použití více snímačů pravděpodobně vedlo k jejich výraznému zpřesnění. Pozitivní vliv by rovněž mělo snímání ve více bodech po délce nosníku.

V další práci bude realizováno poškození jednotlivých nosníků a proveden obdobný dynamický experiment. Na základě změn modálních vlastností bude provedena identifikace poškození.

PODĚKOVÁNÍ

Výsledky byly získány za finanční podpory grantu GAČR 103/07/P380.

LITERATURA

- [1] Brepta, R. - Půst, L. - Turek, F.: Mechanické kmitání, Technický průvodce 71, nakladatelství Sobotáles, Praha, 1994.
- [2] Frantík, P. - Lehký, D.: Význam vlastních frekvencí pro lokalizaci poškození konzolového nosníku. Pravděpodobnost porušování konstrukcí – PPK 2006, Brno, Česká republika, 2006, 307-312.
- [3] Frantík, P. - Lehký, D. - Novák, D.: Modal properties study for damage identification of dynamically loaded structures. The Third International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa, 703-704, 2007.
- [4] Pirner, M. - Fisher, O.: Identifikace změn v konstrukci s použitím dynamické zkoušky, sborník konference DYN-WIND 2003 (Proceedings of the 2nd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering), Tále, Slovensko, 2003, 26-29.
- [5] SOFiSTiK AG.: SOFiSTiK Analysis Programs, version 21.0, Oberschleissheim, Germany, 2004, <http://www.sofistik.com>.