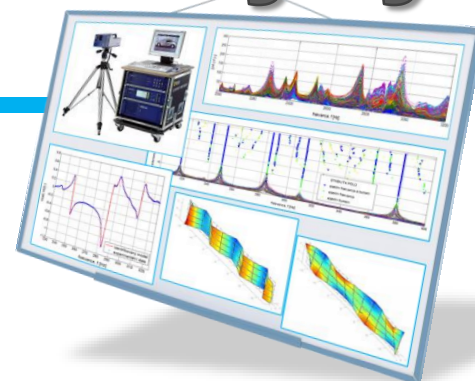




Pokročilé algoritmy experimentální modální analýzy

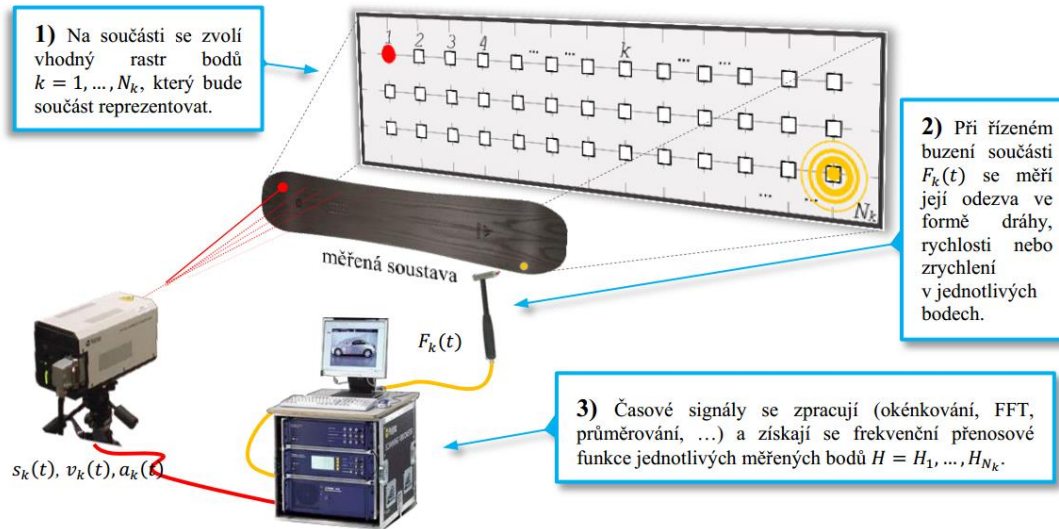
obhajoba diplomové práce



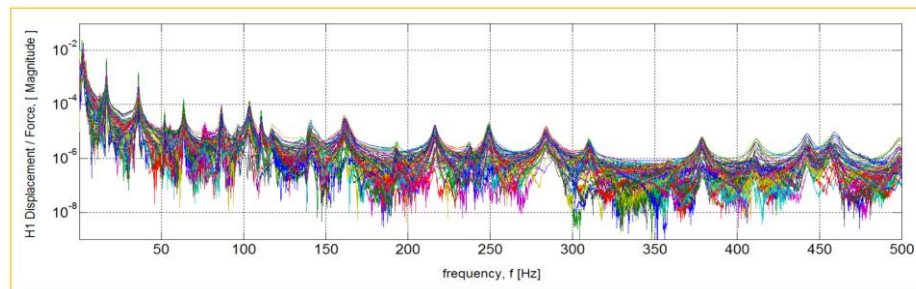
autor: Petr Sobotka

vedoucí: Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.

Modální zkouška a experimentální modální analýza



Získané přenosové funkce měřené soustavy z modální zkoušky



Zpracování naměřených dat pomocí metod experimentální modální analýzy

Výstupem EMA jsou: vlastní frekvence, poměrná tlumení, vlastní tvary, matematický model

Motivace a cíle diplomové práce

Motivace diplomové práce

- Rozvoj nových materiálů, jejichž charakteristiky není snadné určit kvůli blízkým módům
- Řada komerčních programů stále používá jednoduché přístupy nebo je jejich postup identifikace nejasný – blackbox software
- Laserový vibrometr v laboratořích Ústavu mechaniky FS

CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

- Zmapování moderních MDOF přístupů k EMA a výběr vhodného postupu na základě požadavků (identifikace musí: být rychlá, pracuje s naměřenými daty ve formě FRF, omezit nutnou interakci s uživatelem, se získat matematický model)
- Implementace a optimalizace vybraných algoritmů v prostředí Matlab a vytvoření uživatelsky přívětivé a transparentní aplikace
- Otestování použitelnosti na datech s různým stupněm kvality

Použité modely pro identifikaci

EMA algoritmy

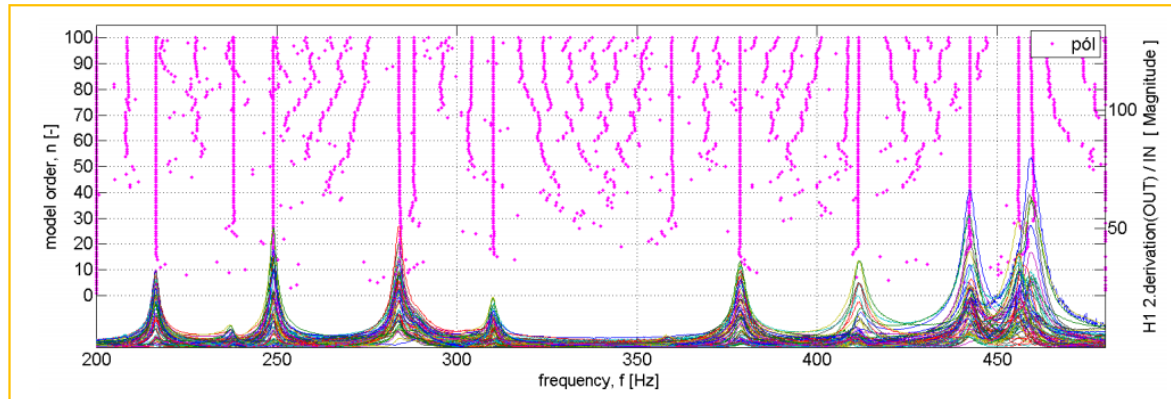
- ~~SDOF modely (naměřená data se vyšetřují po částech)~~
- *MDOF modely*
 - *Stavový model*
 - *Modální model*
 - ...
 - *Model obecné přenosové funkce*
 - 1) *linearizovaný*
 - 2) *iterační nelineární s počátečními podmínkami z lineárního výpočtu*

Model obecné přenosové funkce upravený pro globální charakter pólů mechanického systému

$$H(s) = \frac{\begin{bmatrix} b_{10} + b_{11}s + \dots + b_{1j}s^j + \dots + b_{1n}s^n \\ b_{20} + b_{21}s + \dots + b_{2j}s^j + \dots + b_{2n}s^n \\ \vdots \\ b_{k0} + b_{k1}s + \dots + b_{kj}s^j + \dots + b_{kn}s^n \\ \vdots \\ b_{Nk0} + b_{Nk1}s + \dots + b_{Nkj}s^j + \dots + b_{Nkn}s^n \end{bmatrix}}{[a_0 + a_1s + \dots + a_js^j + \dots + a_ns^n]}$$

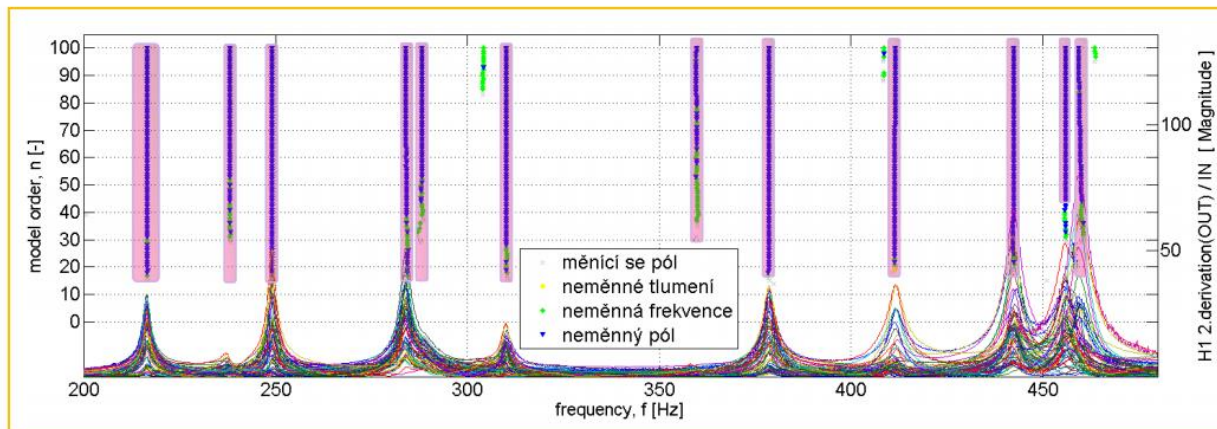
Řešení neznámého rozsahu parametrů

Stabilizační diagram v základní podobě



Počáteční fáze konstrukce stabilizačního diagramu – zobrazení pólů ve FRF grafu pro postupně se zvyšující řád modelu

Stabilizační diagram se zavedenými kritérii

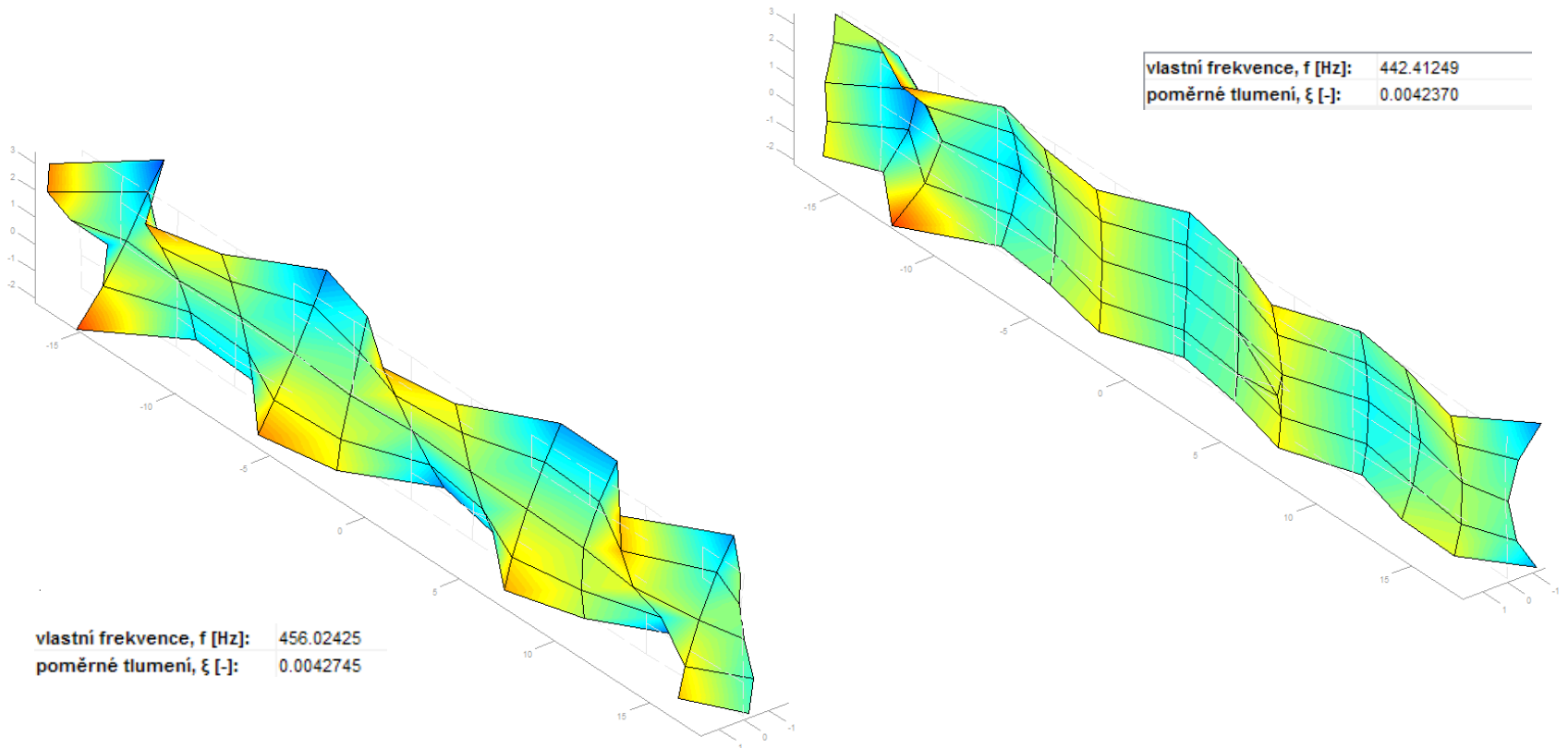


Příklad plně zkonstruovaného stabilizačního diagramu se zavedenými kritérii $\Delta f_{max} = 0,6 \cdot \Delta f$ a $\Delta \zeta_{max} = 5\%$

Získané výstupy

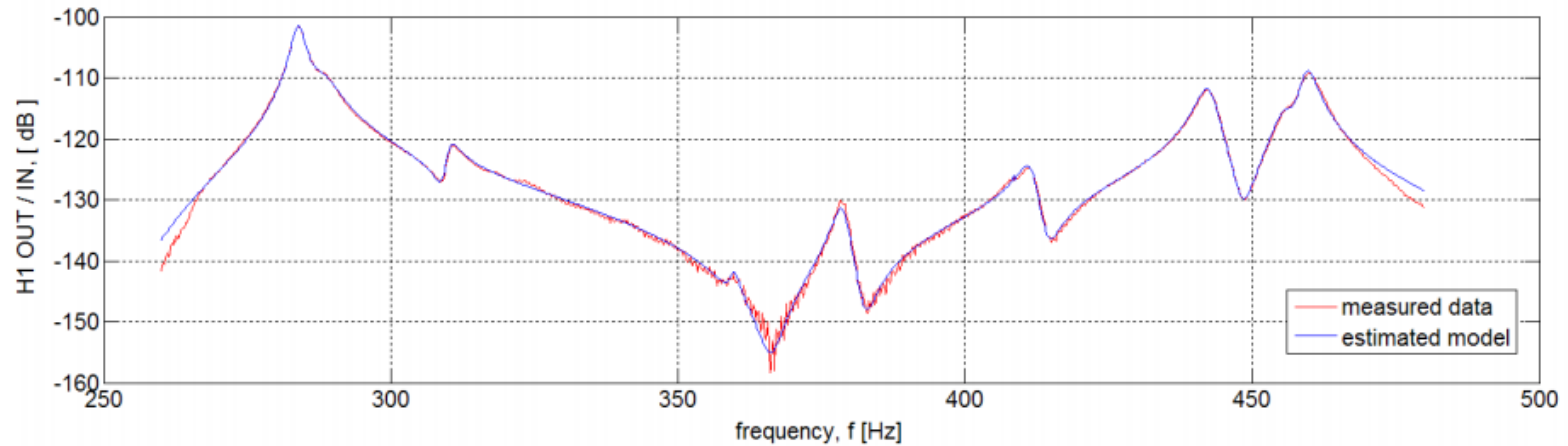
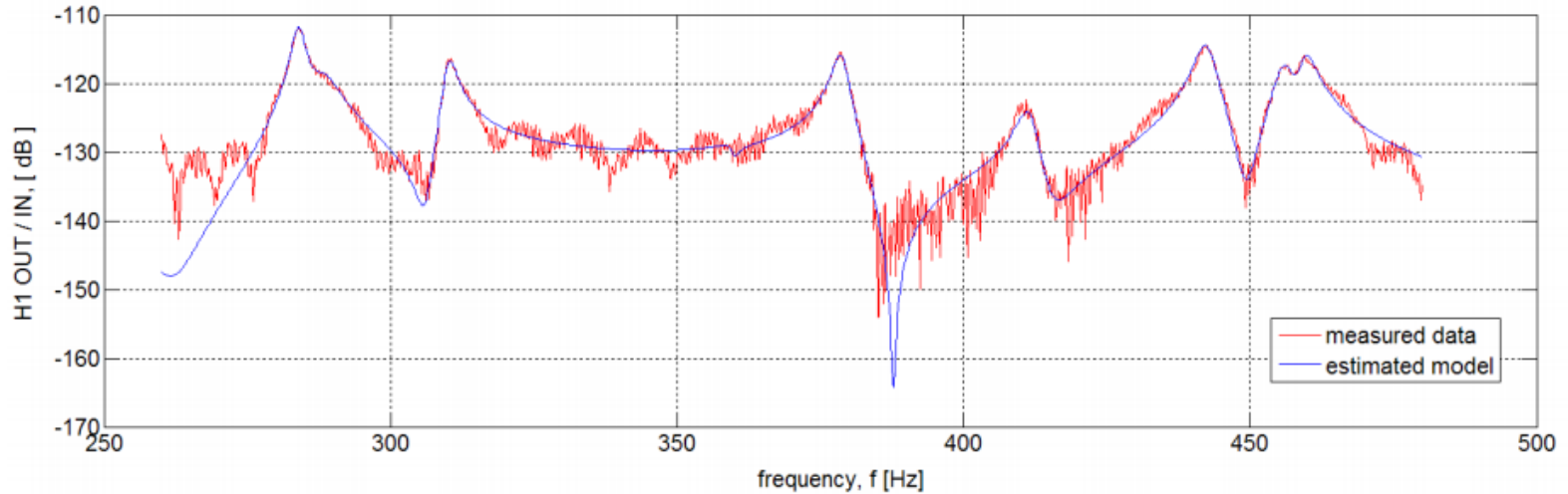
Aplikací uvedených postupů lze získat důležité výsledky vztahující se k vyšetřované soustavě:

✓ vlastní frekvence + poměrná tlumení + vlastní vektory



Získané výstupy

- ✓ matematický model s redukováným rozsahem parametrů



Vytvořená aplikace v Matlabu

sobEMA MDOF

Software pro experimentální modální analýzu. Za použití pokročilých metod modální analýzy (podíl polynomů se společným jmenovatelem, stabilizační diagram, shlukování, LM-optimalizace) identifikuje z naměřených přenosových dat měřený systém a vytvoří jeho matematický modální model.

sobEMA_MDOF_vis

POLYTEC data
frekvenční (.svd)

UFF data
frekvenční (.uff)

MATLAB data
časová (.mat)

název regresního modelu

LINEAR LEAST SQUARES COMPLEX FREQUENCY - zdomain - real coefficients - lowest coef. a_0=1 - coded for stabilization chart

seznam regresních modelů

- IDENT_polynomial_model_z_domain
- IDENTupdate_polynomial_model_z_domain
- LSCF_Z_ComplexCoefsA01_STABCHART_opt
- LSCF_Z_RealCoefsA01_STABCHART_opt
- WLSCF_Z_RealCoefsA01_STABCHART_opt

charakteristika regresního modelu

- **PARAMETRY regrese:**
 - omezení charakt. polynomu v mat. modelu: nejnižší koef. je a_0 = 1
 - použita diskretní proměnná $z = \exp(i \cdot \omega \cdot \Delta T)$
 - reálné koeficienty polynomů
 - bez váhové funkce
 - výpočetně optimalizovaný kód
- **POSTUP výpočtu:**
 1. Výpočet pólů pomocí LSCF pro postupně se zvyšující řády polynomů
 2. Výběr fyzikálních pólů zapomocí stabilizačního diagramu
 3. Dopočet residuí modálního modelu pomocí LSRE (již lineární problém), popř. mezikrok iterativního algoritmu MLE
 4. Dopočet vlivu okolních módů a sestavení výsledného mat. modelu

i
v
í
c
e
i
n
f
o

název projektu

Scan_Mojmir_12082011_project

info o načteném souboru

název souboru	Scan Moimir 12082011.svd
datum vytvoření, autor	
titulek souboru	
komentář	Uložení - draty, buzení - kladivko, plast, do 500 Hz

geometrie

IDENTIFIKACE
modálních parametrů

vyšetřovaný frekvenční rozsah

zobrazený přenos

H1 {2.derivation(OUT) / IN}

display: Magnitude

point: All points

vyšetřovaný frekvenční rozsah [Hz]

0.15625 198.75

začátek frekv. rozsahu konec frekv. rozsahu

↺ ↻ ↷

nastavit max. im. část / frekvenční rozsah

načtený frekvenční rozsah

Vytvořená aplikace v Matlabu

sobEMA MDOF

Software pro experimentální modální analýzu. Za použití pokročilých metod modální analýzy (podíl polynomů se společným jmenovatelem, stabilizační diagram, shlukování, LM-optimalizace) identifikuje z naměřených přenosových dat měřený systém a vytvoří jeho matematický modální model.

sobEMA_MDOF_vis

POLYTEC data
frekvenční (.svd)

UFF data
frekvenční (.uff)

MATLAB data
časová (.mat)

název regresního modelu

LINEAR LEAST SQUARES COMPLEX FREQUENCY - zdomain - real coefficients - lowest coef. a_0=1 - coded for stabilization chart

seznam regresních modelů

- IDENT_polynomial_model_z_domain
- IDENTupdate_polynomial_model_z_domain
- LSCF_Z_ComplexCoefsA01_STABCHART_opt
- LSCF_Z_RealCoefsA01_STABCHART_opt
- WLSCF_Z_RealCoefsA01_STABCHART_opt

charakteristika regresního modelu

- **PARAMETRY regrese:**
 - omezení charakt. polynomu v mat. modelu: nejnižší koef. je a_0 = 1
 - použita diskretní proměnná $z = \exp(i \cdot \omega \cdot \Delta T)$
 - reálné koeficienty polynomů
 - bez váhové funkce
 - výpočetně optimalizovaný kód
- **POSTUP výpočtu:**
 1. Výpočet pólů pomocí LSCF pro postupně se zvyšující řády polynomů
 2. Výběr fyzikálních pólů zapomocí stabilizačního diagramu
 3. Dopočet residuí modálního modelu pomocí LSRE (již lineární problém), popř. mezikrok iterativního algoritmu MLE
 4. Dopočet vlivu okolních módů a sestavení výsledného mat. modelu

i
v
í
c
e
i
n
f
o

název projektu

Scan_Mojmir_12082011_project

info o načteném souboru

název souboru	Scan Moimir 12082011.svd
datum vytvoření, autor	
titulek souboru	
komentář	Uložení - draty, buzení - kladivko, plast, do 500 Hz

geometrie

IDENTIFIKACE
modálních parametrů

vyšetřovaný frekvenční rozsah

zobrazený přenos

H1 {2.derivation(OUT) / IN}

display: Magnitude

point: All points

vyšetřovaný frekvenční rozsah [Hz]

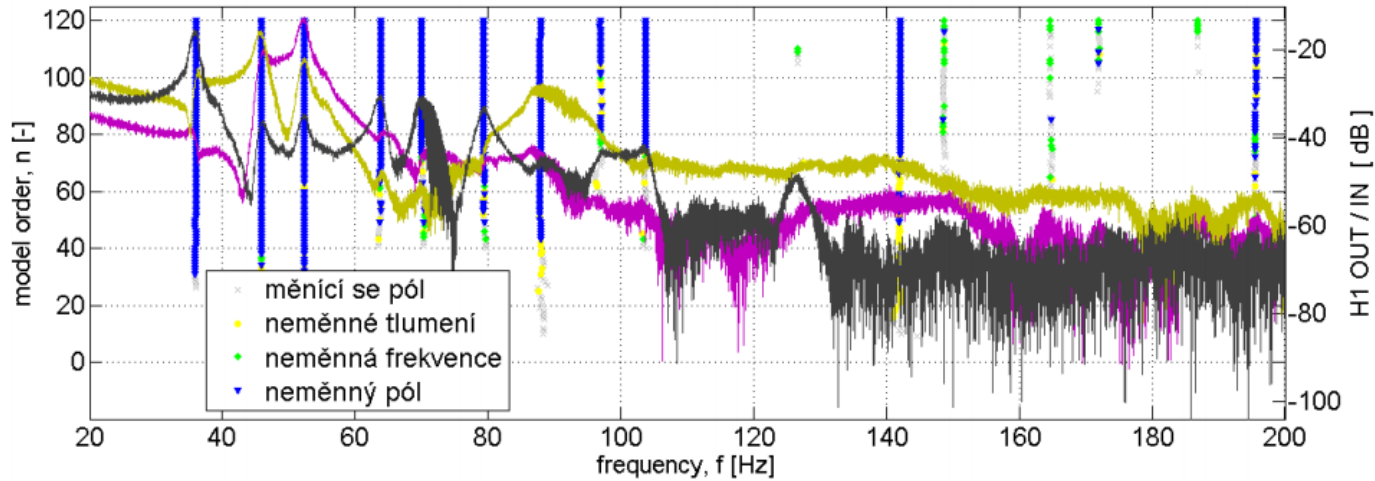
0.15625 198.75

začátek frekv. rozsahu konec frekv. rozsahu

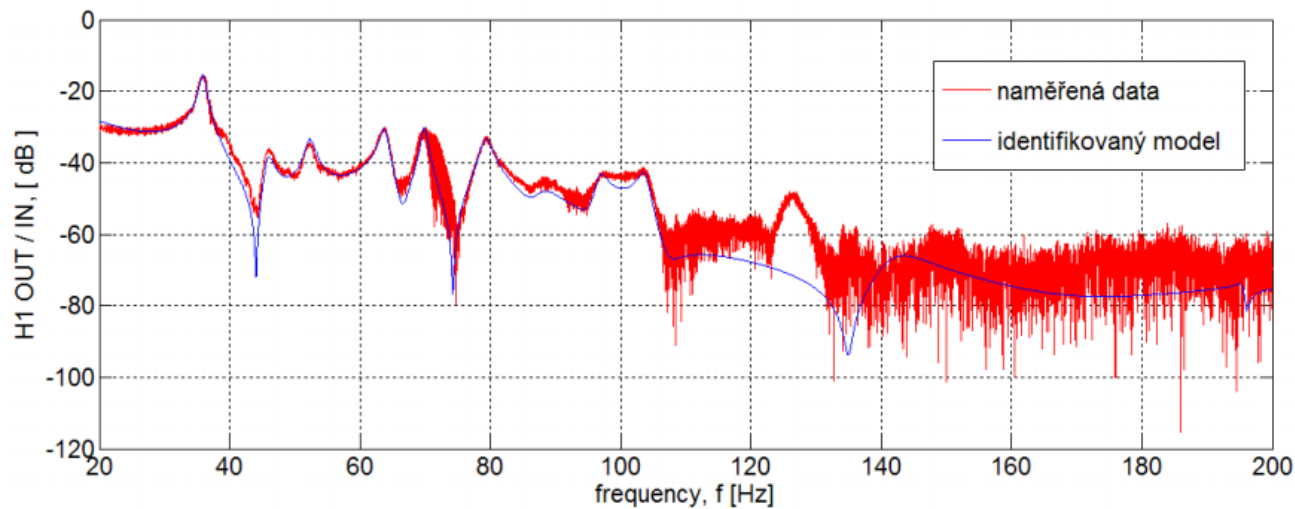
nastavit max. množství frekvenčního rozsahu

načtený frekvenční rozsah

Identifikace modelu z dat s nižší kvalitou



Příklad sestaveného stabilizačního diagramu při použití naměřených dat s nižší kvalitou



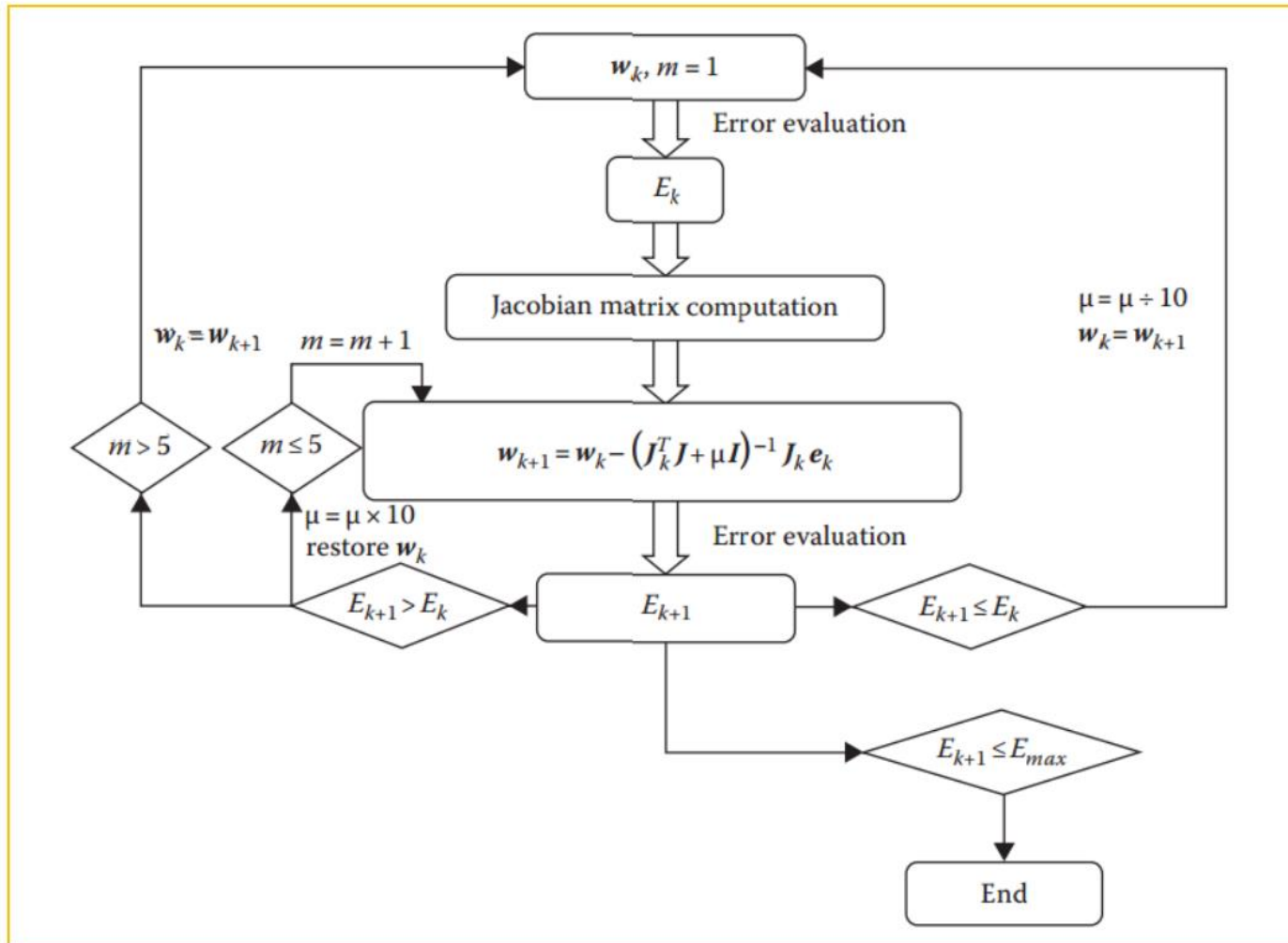
Srovnání naměřených dat s identifikovaným modelem pro data s nižší kvalitou

■ Otázka č. 1

Váhová funkce - jednotky?

Otázka č. 2

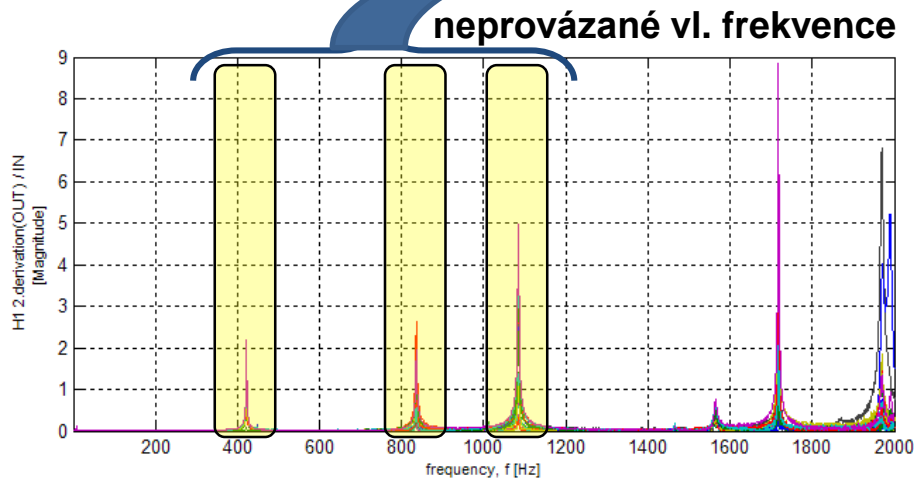
Co je na obr. 18 symbol e_k a jak souvisí s E_k ?



Obr. 18 – Schéma výpočtu iteračního Levenberg-Marquardtova algoritmu (zdroj [13])

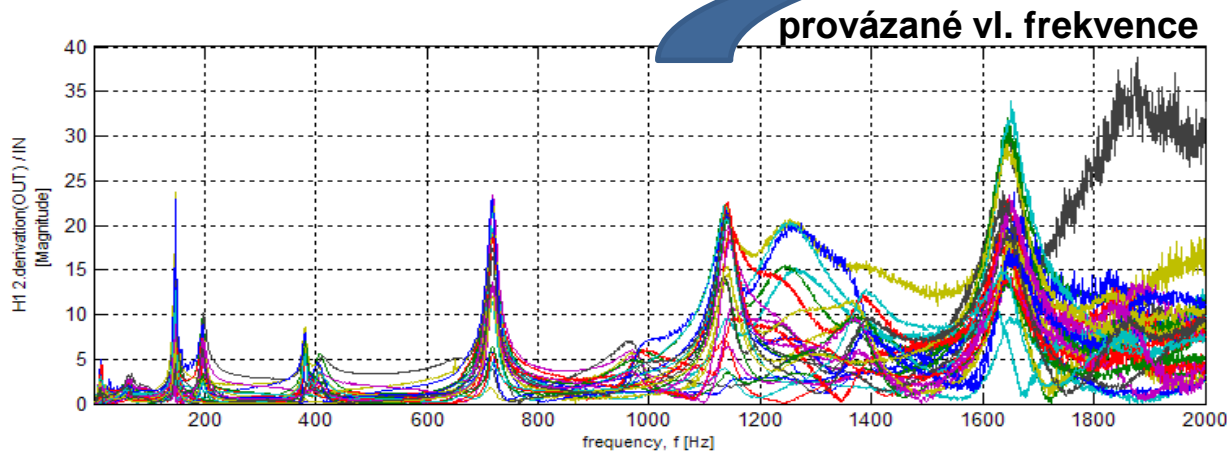
Otázka č. 3

Co se rozumí provázaností vlastních frekvencí (str. 27)?



Jednotlivé vlastní frekvence se neovlivňují navzájem – hodnoty v dané vlastní frekvenci jsou důsledkem pouze jedné vlastní frekvence.

K jejich vyšetření je možno přistupovat odděleně – pomocí SDOF modelů.



Hodnoty v dané vlastní frekvenci jsou ovlivněny i okolními módy. Aplikace SDOF modelů při vyšetřování jednotlivých vlastních frekvencí je obtížné.

■ Otázka č. 4

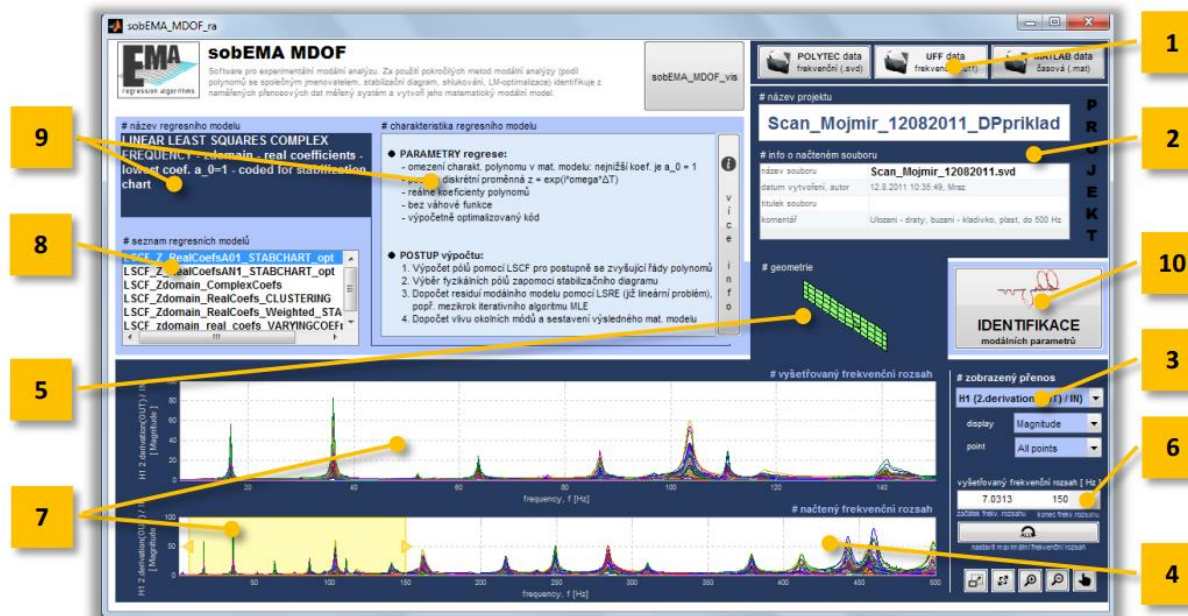
Ve vztahu (38) je uveden empirický vztah volby řádu modelu a volby počtu vlastních frekvencí. Byla ověřena jeho směrodatnost pro různé analyzované struktury.

$$n = (10 \div 12) \times \text{počet vlastních frekvencí} \quad , \quad \text{počet vl. frekv.} \in \langle 1; 20 \rangle \quad . \quad (38)$$

Otázka č. 5

Jaká jsou kritéria „vhodnosti“ pro volbu frekvenčního rozsahu a algoritmu výpočtu (str. 45 odst. iii, iv).

- iii. Na základě zobrazených přenosů je zvolen vhodný frekvenční rozsah pro identifikaci **6**, který je samostatně vykreslen **7**.
- iv. Výběrem vhodného algoritmu **8**, jehož parametry jsou shrnuty v poznámkách **9**, lze přistoupit k samotné identifikaci **10**.



Obr. 21 – Základní okno sobEMA pro načtení, vizualizaci naměřených dat a zvolení identifikačního postupu

■ Otázka č. 6

Jak při měření vzorku byla testována věrohodnost získávaných dat (volba průměrování, kritéria přijatelnosti hodnoty koherence, kontrolní opakování shodného případu měření apod.)?

Při měření pomocí vibrometru PSV-400:

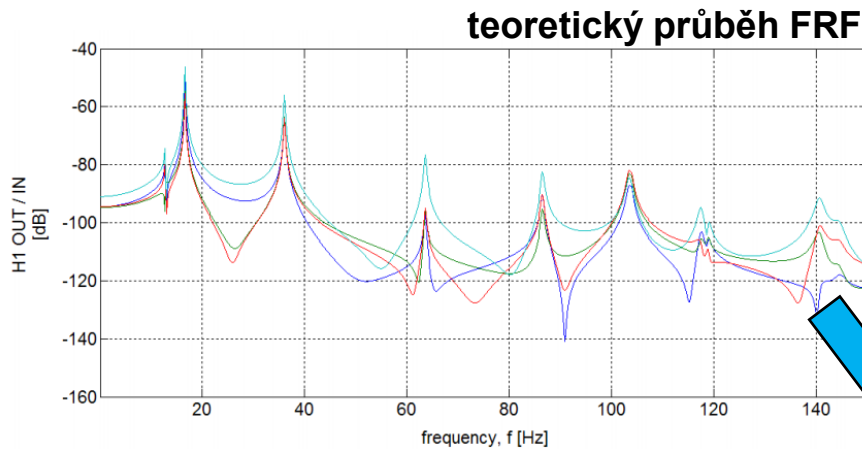
- dostatečné vybuzení (kontrola softwarem PSV-400)
- průměrování opakovaných měření – zpravidla 3x
- vizuální kontrola koherence

■ Otázka č. 7

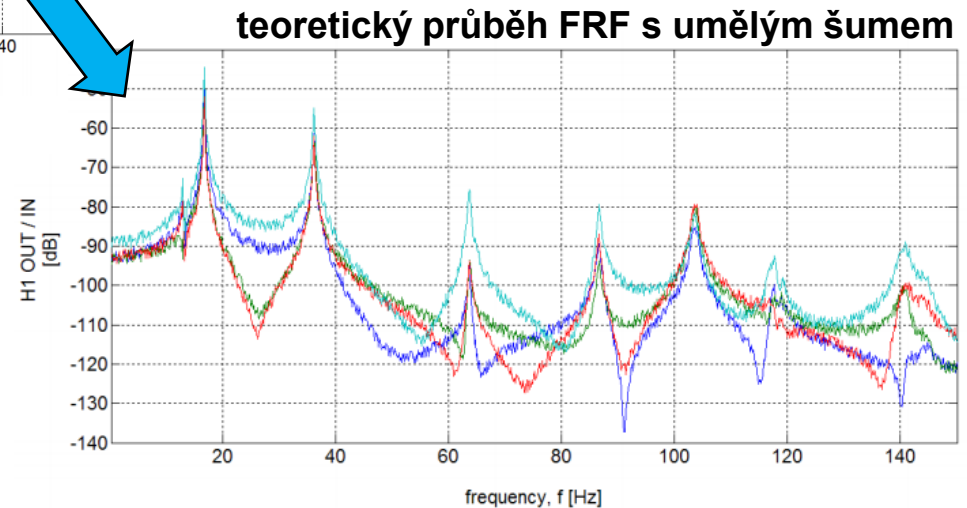
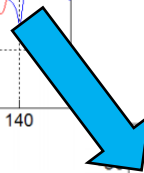
Byl pro srovnání získaných modálních modelů testován i jiný způsob měření (buzení v jednom místě vzorku budičem a odezvy ve všech místech, měření s putovním akcelerometrem apod.)?

Otázka č. 8 (1. část)

Na obr. 29 a 30 jsou výsledky (vliv šumu) pro obojí případ výpočtu (lineární model, dtto s nelineární optimalizací) identické; jaké je vysvětlení? Proč chybí určení dvou blízkých módů z okolí frekvence 103 a 117 Hz (viz tab. 3)?

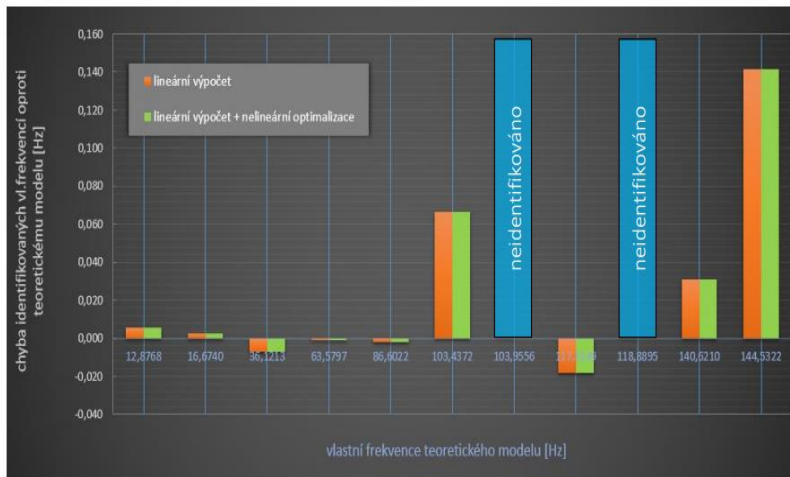


Obr. 25 – Přenosy teoretického modelu

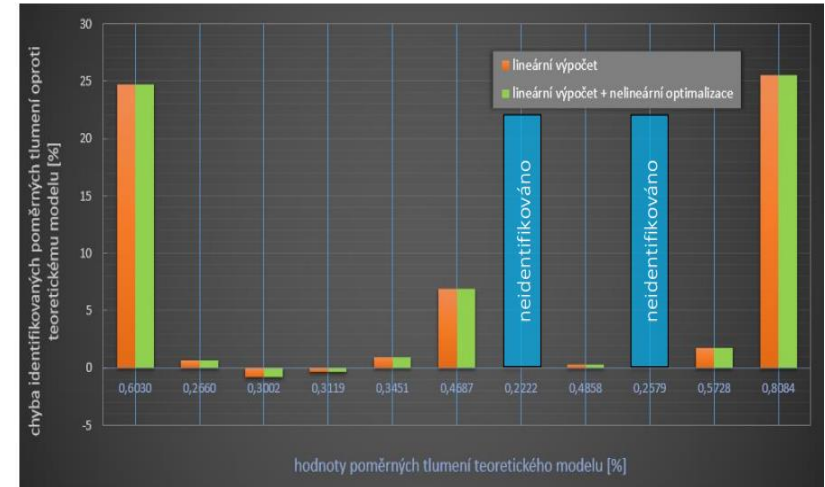


Obr. 28 – Původní teoretický model z Obr. 25 s přidáním šumem

Otázka č. 8 (2. část) + otázka č. 9



Obr. 29 – Porovnání chyby identifikovaných vlastních frekvencí z teoretických FRF s šumem oproti teoretickému modelu



Obr. 30 – Porovnání chyby identifikovaných poměrných tlumení z teoretických FRF s šumem oproti teoretickému modelu

Jak byla vybrána data uvedená v tabulce 3?

Tab. 3 – Hodnoty vlastní frekvencí a poměrných tlumení pro teoretický model

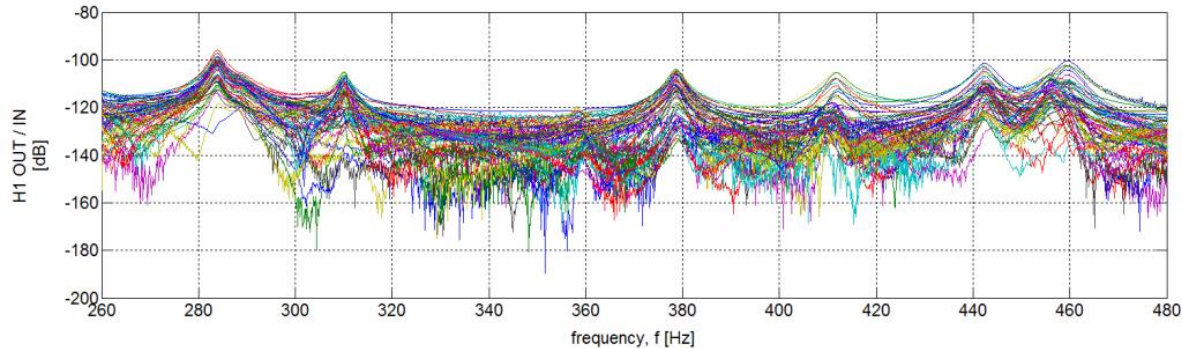
vlastní frekvence [Hz] (hodnoty zaokrouhleny)										
12,88	16,67	36,12	63,58	86,60	103,44	103,96	117,51	118,89	140,62	144,53
poměrná tlumení [%] (hodnoty zaokrouhleny)										
0,60	0,27	0,30	0,31	0,35	0,47	0,22	0,49	0,26	0,57	0,81

Otázka č. 10

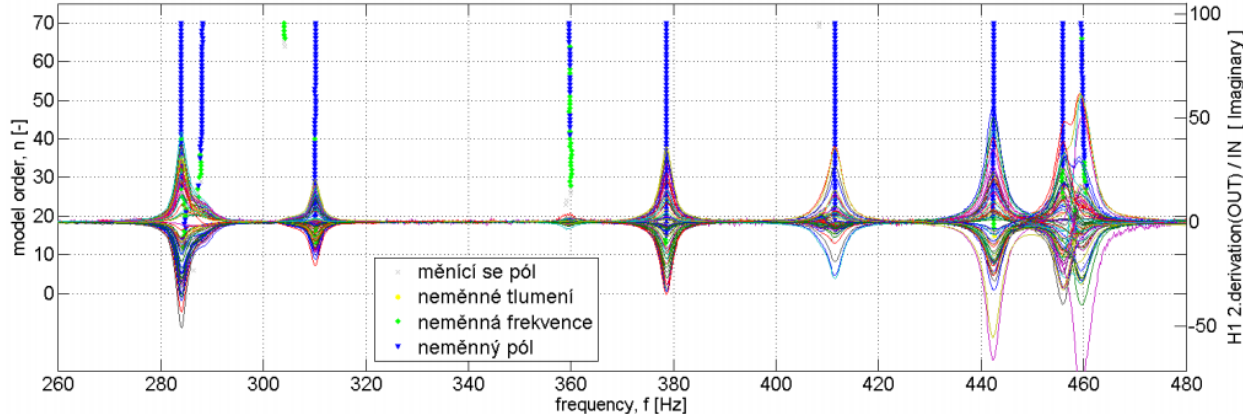
Proč jsou data z měření pomocí laserového vibrometru „bez větších hodnot šumu“ (str. 53); bylo provedeno srovnání s jinými způsoby měření a s jakými kvantifikovanými výsledky?

Otázka č. 11

Proč byl pro obrázky 33, 34 volen frekvenční obor $f \in (260, 480)$ a ne prakticky zajímavější obor $f \in (0, 200)$ Hz, viz obr. 10 a tab.1?



Obr. 33 – Naměřené frekvenční přenosy kompozitní struktury



Obr. 34 – Stabilizační diagram se zavedenými kritérii

■ Otázka č. 12, 13, 14, 15

12) *Byly získané výsledky (snowboard) ověřovány ještě jinými metodami (jednoduššími např. pomocí Nyquistových kružnic) ?*

13) *Proč je kladen důraz na vysokou rychlost výpočtu?*

14) *Jaká by byla doporučení pro konstrukci, tvar, provedení atd. pro výrobce snowboardů, plynoucí z výsledků provedené experimentální modální analýzy*

15) *V závěru se hovoří o užívání popsaného softwaru v rámci výzkumných projektů ústavu; je možno uvést příklady?*