

INTERPRETATION OF EFFECTIVE VALUE OF NON-STATIONARY BUILDING VIBRATION

C. Fischer, S. Pospíšil *

Summary: *The effective value is widely used for the assesment of buildings and civil structures with respect to their health admissibility. In the stationary case the efective value is strictly related to the dispersion of the vibration record. The presented article treats the case when a non-stationary vibrations are analyzed and the characteristic values of processes ares ascertained. Several methods for signal processing are compared, including the Wavelet Multiresolution Analysis and the Empirical Mode Decomposition. The effective values obtained using the respective methods are compared and relevant conclusions related to the practical applications are drawn.*

1. Úvod

Efekt vibrací na člověka je již dlouhou dobu známým fenoménem, viz např. (Griffin 1990). Lidské tělo je do jisté míry podobné mechanickému systému a vnímání vibrací závisí na frekvenci, směru, amplitudě a na délce trvání pohybu. Výzkum vlivu vibrací a s tím spojených mezních stavů použitelnosti jsou pro vratné jevy složitě definovatelné a s jejich definicí či normativním začleněním vznikají obtíže. Některé osoby pocítují zrychlení při vibracích slabě, někteří uživatelé je naopak nemohou tolerovat. V publikaci (Stafford-Smith 1991) jsou přehledně uvedeny hodnoty zrychlení roztržiděné do několika kategorií od slabého vnímání až po nevolnost.

Ekonomické důsledky překročení hygienických předpisů jsou závažné a náklady na odstranění škod a příčin mohou tvořit relativně velkou část výdajů na celou stavbu. Stavební praxe nejednou tuto skutečnost potvrdila (viz Hansen 1999, Ellis 1979).

Nepříjemné vnímání pohybu objektu se běžně objevuje při kmitání působeného vlivem větru, dopravy (metro, tramvaje, nákladní automobily) nebo tzv. technologické seismicity. Opakované překročení prahové hodnoty vnímání vibrací lidským organismem je využito jako kritérium pro rozhodnutí, zda je konstrukce z tohoto pohledu vyhovující či nikoliv. Mezní stav použitelnosti s ohledem na pohodlí uživatelů je definován jako procento osob, které vibrace silně nepříjemně pocítují. Tento subjektivní údaj je doplněn o dobu, po kterou je toto kmitání přijatelné. Lidé většinou vnímají vibrace lépe, jsou-li na ně připraveni a doba trvání je krátká. Naopak, dlouhá

* RNDr. Cyril Fischer, Ph.D., Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D., Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Prosecká 76, 190 00 Praha 9, tel. +420 286 88 21 21, e-mail FischerC@itam.cas.cz

doba trvání kmitání způsobuje ztrátu pohodlí a někdy i nevolnost. Prahové hodnoty uváděné v předpisech jsou pak proto relativně nízké.

Pro posouzení kmitání se vychází z hygienických a technických norem, které jsou založeny na systematickém výzkumu. U nás se jedná o „Nařízení vlády č. 502/2000 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací“ nebo podle normy ČSN 730040 „Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva“. Podle těchto dokumentů se vibrace ve stavbách pro bydlení a ve stavbách občanského vybavení stanovují efektivními hodnotami zrychlení (pro vnímání vibrací uživateli objektu), či efektivními hodnotami rychlosti (pro stanovení odolnosti konstrukce na zatížení technickou seismicitou), které jsou veličinami integrálními a lépe vystihují skutečnost, že pro vnímání vibrací či odezvu na vibrace je potřeba určitá doba trvání jevu.

Je zřejmé, že v případě naměřených vibrací, které leží na hranici přijatelnosti, může i malá odchylka ve vyhodnocení způsobit buď zastavení stavebních prací nebo nákladné úpravy. Efektivní hodnota zrychlení může být nepatrně překročena například pouze na základě příliš konzervativně zpracovaného signálu, nebo může být naopak podceněna. Proto je volbě metody analýzy jednotlivých realizací procesu potřeba věnovat značnou pozornost.

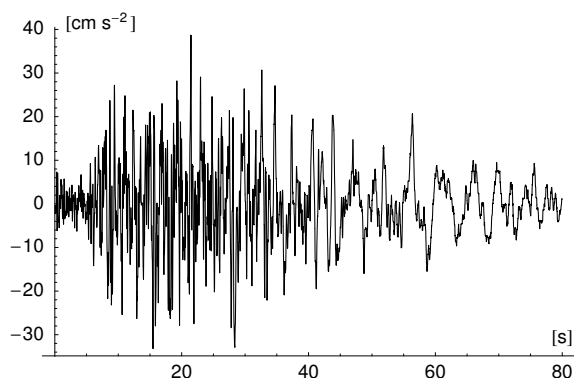
Článek se zabývá porovnáním několika metod vyhodnocování zrychlení vibrací a vlivem nestacionarity na výsledné charakteristické hodnoty. Jsou porovnány klasické metody založené na variantách Fourierovy analýzy s metodami, které pracují s rozkladem signálu do speciálních funkcí jako jsou wavelety nebo tzv. „intrinsic mode functions“.

2. Charakteristické záznamy nestacionárních procesů

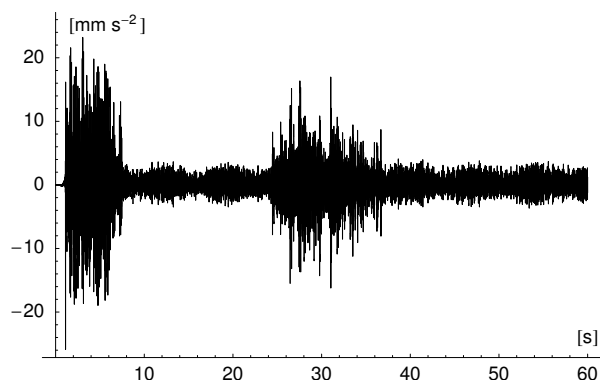
Celý postup bude ukázán na dvou typických příkladech seismického záznamu: Na záznamu zemětřesení „Landers“, 28. června 1992, ze stanice Downey, county maint. building (obr. 1a) a záznamu měření vibrací na místě budovy stojící v blízkosti podzemní dráhy, (obr. 1b). Záznamy byly zbaveny vlivu záznamové aparatury.

Oba příklady jsou nestacionární, každý však jiným způsobem. Měření na budově vystihuje vibrace způsobené dopravou s výraznějšími úseky s až pětinasobnou amplitudou při přejezdu metra. Ve frekvenční oblasti obsahuje tento záznam pouze několik výrazných frekvencí.

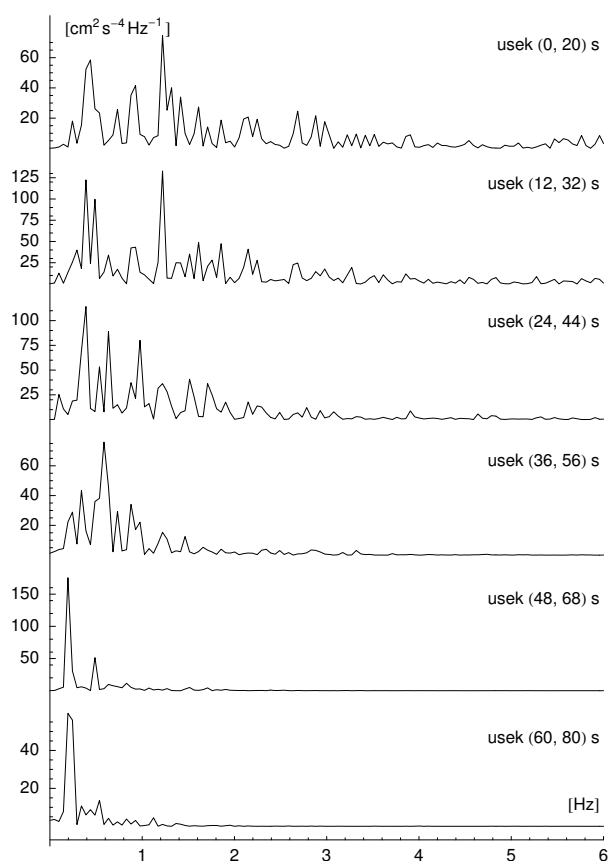
Záznam zemětřesení rovněž obsahuje několik silnějších a slabších úseků, ve frekvenční oblasti se však spektrum v čase výrazně mění, když s rostoucím časem klesá podíl složek obsahující vyšší frekvence.



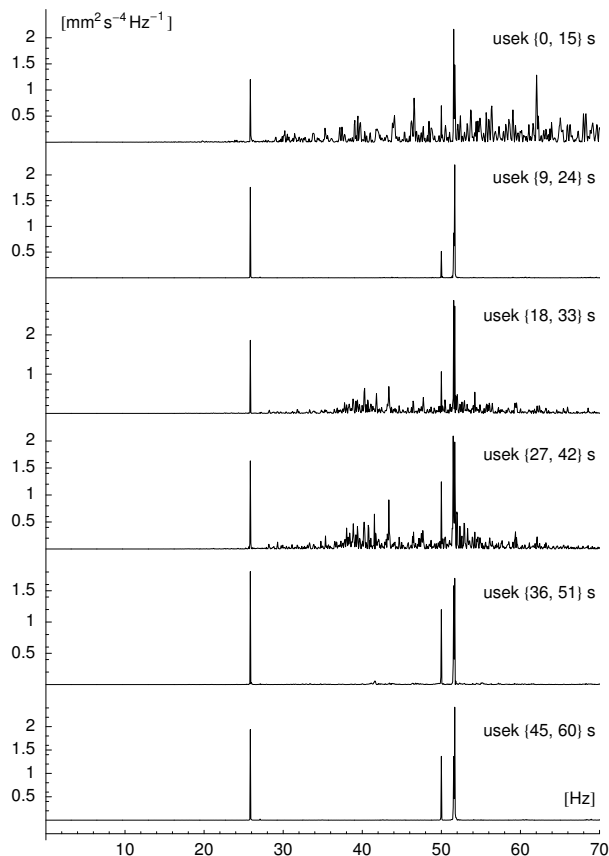
Obrázek 1a: Akcelerogram zemětřesení Landers, 28. června 1992



Obrázek 1b: Pohyb budovy způsobený dopravou



Obrázek 2a: Odhady spekter různých úseků záznamu zemětřesení



Obrázek 2b: Odhady spekter různých úseků záznamu dopravy

Obrázky 2a,b ukazují periodogramy počítané pro různé časové úseky záznamů. Je vidět, že zvláště spektrum záznamu zemětřesení se v čase výrazně mění. V takovém případě je obzvláště nepřesné používat Welchovu metodu k výpočtu výkonové spektrální hustoty (PSD), která za spektrální hustotu považuje aritmetický průměr takto napočítaných periodogramů. Naopak v případě měřené budovy, kde se spektra vypočtená z jednotlivých úseků liší v podstatě pouze v okamžicích projevu metra, je Welchovu metodu (viz Cohen 1995) s jistými výhradami možné využít.

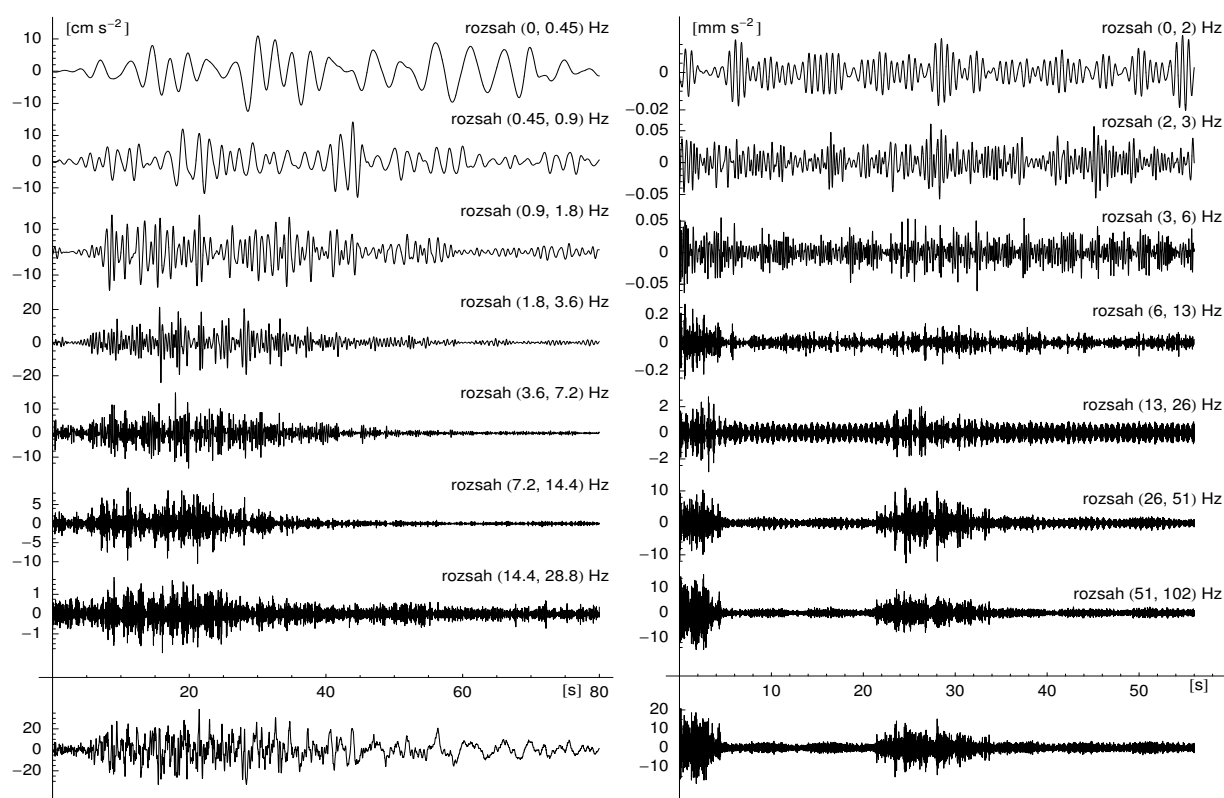
3. Frekvenční rozklady

Waveletová Multiresolution Analysis

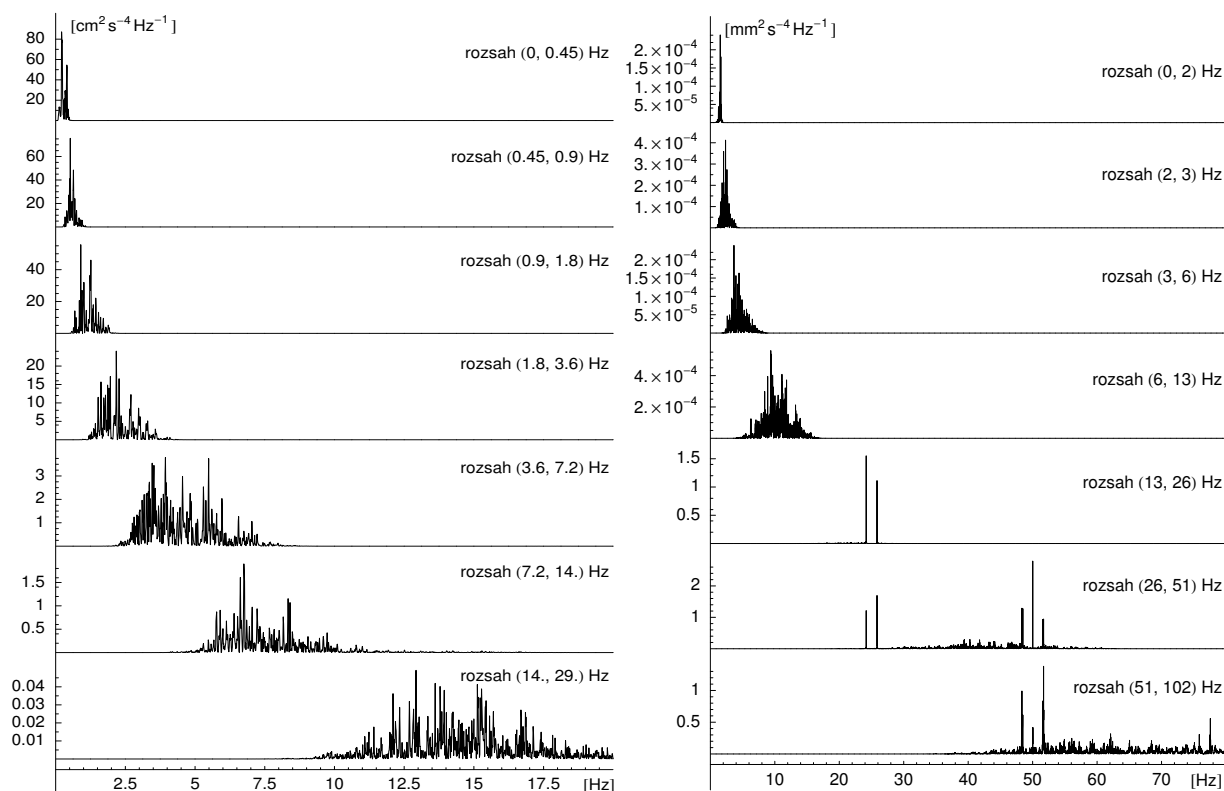
Waveletová Multiresolution Analysis (MRA) (Malat 1989) je dnes již běžným prostředkem ke zkoumání nestacionárních signálů. Spočívá v postupné aplikaci posloupnosti speciálních filtrů a výsledkem je posloupnost úzkopásmových detailů $d_i(t)$ a nízkofrekvenční aproximace $v(t)$ signálu $x(t)$.

$$x(t) = v(t) + \sum_{i=1}^n d_i(t) \quad (1)$$

Jistou nevýhodou klasické MRA je, že každý z detailů popisuje pásmo s dvojnásobnou šířkou oproti detailu předcházejícímu. Abychom dosáhli přesnější lokalizace, museli bychom použít klasickou filtraci.



Obrázek 3a,b: MRA záznamu a) zemětřesení (vlevo) b) vibrací od dopravy (vpravo)

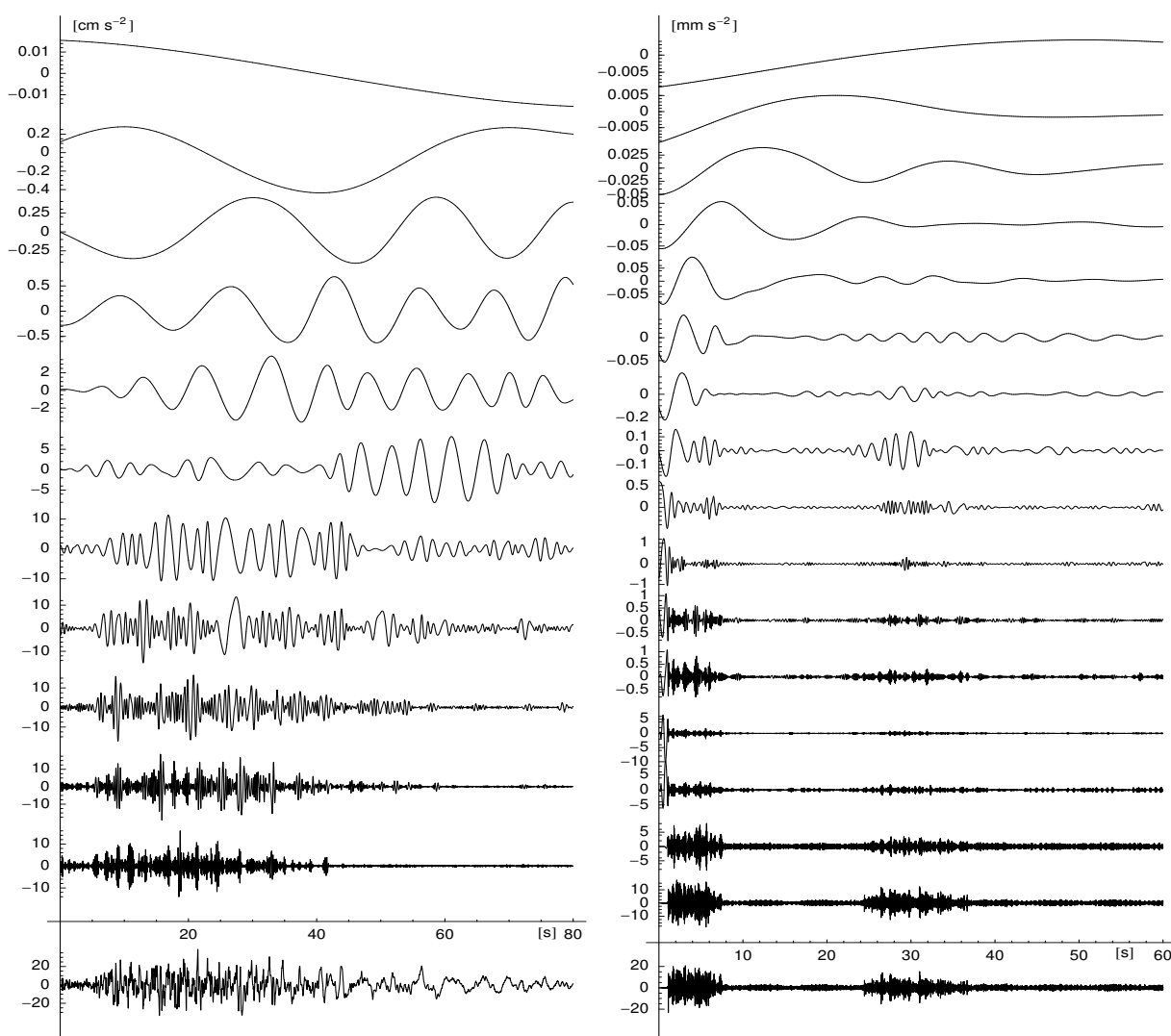


Obrázek 3c,d: Spektra jednotlivých složek MRA záznamu a) zemětřesení (vlevo) b) vibrací od dopravy (vpravo)

Obrázky 3a,b ukazují příklad waveletové MRA založené na Daubechies waveletu řádu 8. Na příkladě zemětřesení (obr. 3a) je vidět, že složky o vyšších frekvencích se utlumí podstatně rychleji než složky nízkofrekvenční. Na druhou stranu, rozklad měření vibrací budovy potvrzuje tvrzení o rovnoměrném zastoupení celého spektra v celém záznamu. Odhady spekter jednotlivých složek rozkladu jsou vykresleny na obrázcích 3c,d. Výhodou takového rozkladu je skutečnost, že jednotlivé složky jsou frekvenčně stacionární, a to i v případě záznamu zemětřesení (viz obrázky 2a, 3a). V takovém případě lze (po vyrovnaní amplitud) zcela oprávněně užívat pro analýzu klasické Fourierovo spektrum či spektrální hustotu. Pojem časově proměnné efektivní hodnoty, zavedený v předchozím odstavci, je v takovém případě zcela opodstatněný.

Rozklad pomocí implicitních funkcí

Jistou speciální modifikací waveletové analýzy je moderní metoda, která využívá tzv. metodu Empirical Mode Decomposition (EMD) (Huang 1996). Tato metoda umožňuje rozklad signálů do složek speciálních vlastností: mají stejný počet extrémů a překročení nuly a jsou rovněž symetrické vzhledem k nulové střední hodnotě definované obálkou lokálních minim a maxim.



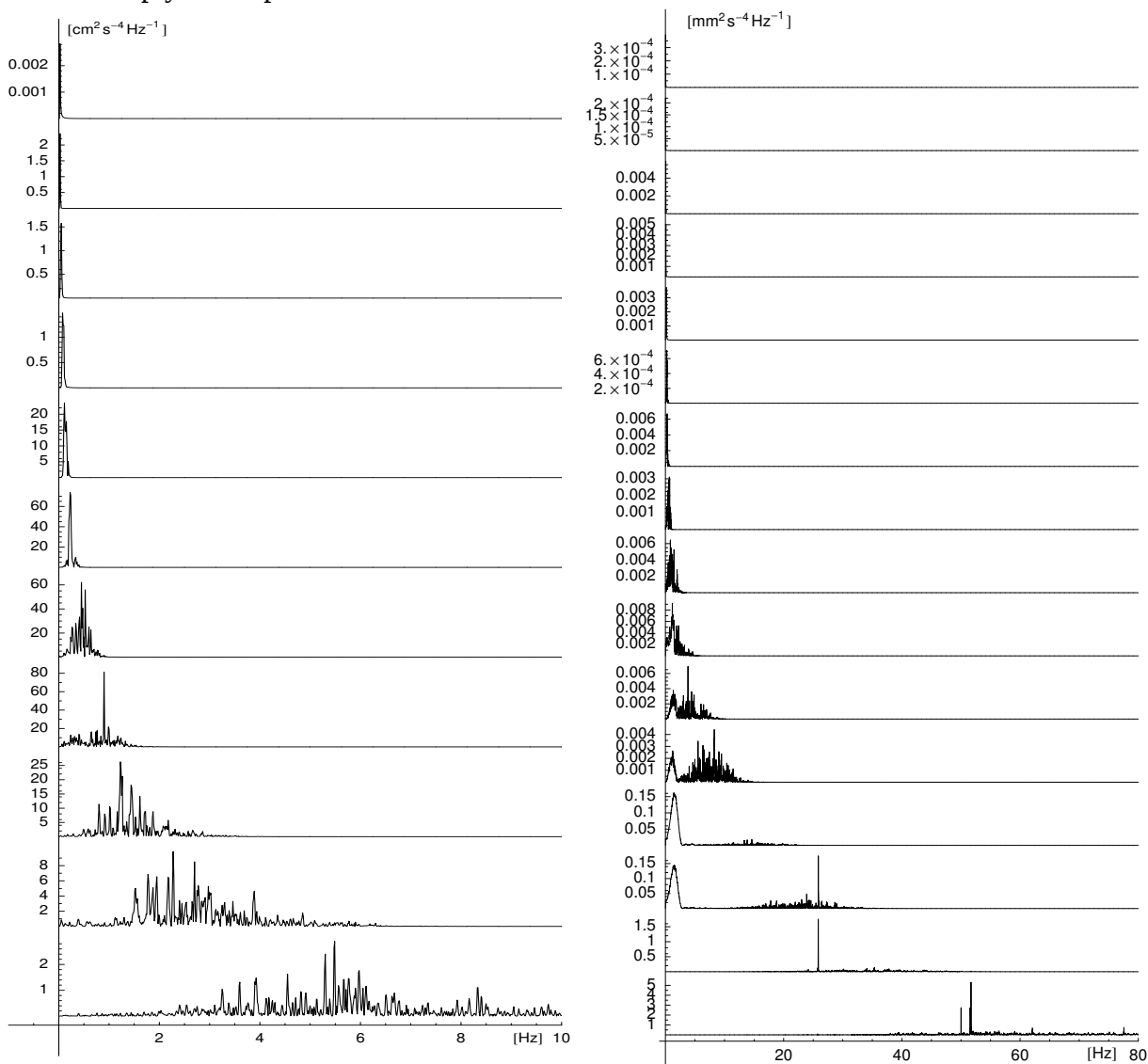
Obrázek 4a,b: Empirický rozklad záznamu a) zemětřesení (vlevo), b) vibrací způsobených dopravou (vpravo)

Rozklad je prováděn iteračním procesem, který postupně odfiltrává složky s vyššími frekvencemi, až zbyde tak zvaný trend původního procesu, který již neobsahuje lokální extrémy. Původní signál lze psát jako součet úzkopásmových složek

$$x(t) = \sum_{i=1}^n p(t) + r_n(t) \quad (2)$$

Funkcím $p(t)$ se říká Intrinsic Mode Function (IMF). Rozklad je kompletní a tyto funkce jsou vzájemně ortogonální, tvoří tedy bázi, kterou ovšem nestanovujeme apriori.

Jak se ukazuje, metoda EMD dobře charakterizuje časově-frekvenční rozložení vlastností signálu, avšak pro spektrální analýzu není příliš vhodná. Jednotlivé složky totiž obsahují parazitní nízkofrekvenční hodnoty, které sice ostatní složky v celkovém součtu kompenzují, samostatně však díky nim neposkytnou dostatečně přesné zhodnocení své frekvenční oblasti. Jev můžeme vidět na obrázcích 4c,d, kde rozptyly jednotlivých komponent rozkladu takřka přesahují hodnotu rozptylu kompletního záznamu.



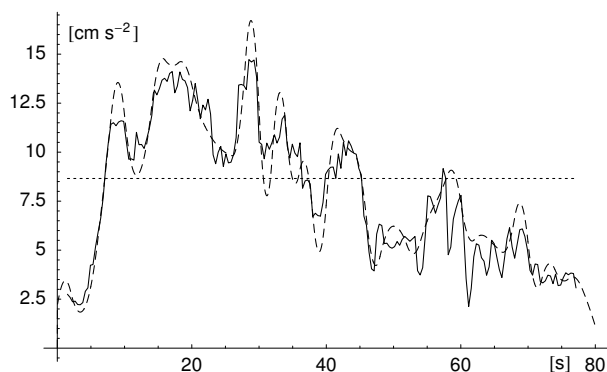
Obrázek 4c,d: Spektra jednotlivých složek EMD a) zemětřesení (vlevo), b) vibrací způsobených dopravou (vpravo)

4. Časově proměnná efektivní hodnota

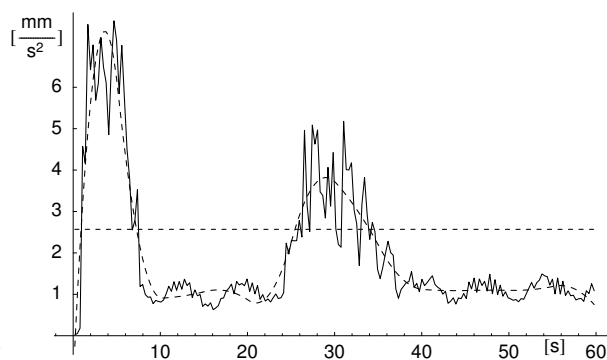
Je zřejmé, že v nestacionárním případě je obtížné přijmout a použít koncepci jediné „efektivní“ hodnoty. Bude nutno namísto toho uvažovat takových hodnot několik, či nejlépe její časový průběh. Z maximálních, minimálních či průměrných hodnot bude možné posoudit závažnost účinků vibrací na konstrukci či člověka.

Další nevýhodou „efektivní hodnoty“ je fakt, že sama nezohledňuje frekvenční skladbu zkoumaných vibrací. Je proto vhodné odfiltrovat ze zkoumaného záznamu ty části spektra, které obsahují z hlediska zkoumaného jevu nepodstatné složky.

Obvyklé filtrování ovšem ovlivňuje kvalitu výsledného signálu, je zatíženo rozhodováním, jaký druh filtru při zpracování použijeme, neboť prakticky každý filtr znehodnocuje frekvenční složení signálu a tudíž i spektrum. Proto se v současnosti stále více používají rozklady záznamu na frekvenčně omezené složky, jejichž součtem vznikne opět původní realizace. V takovém případě je možná kompletní rekonstrukce procesu.



Obrázek 5a: Časově proměnná efektivní hodnota záznamu zemětřesení



Obrázek 5b: Časově proměnná efektivní hodnota záznamu dopravy

Výpočet časově proměnné efektivní hodnoty může probíhat analogicky jako okénková Fourierova transformace. Pro například obdélníkové okénko $w_n(t)$ délky $n\Delta t$ a centrované kolem časového okamžiku $t = 0$ bude

$$a_e(t) = \sqrt{\sum_{\tau=t-n/2\Delta t}^{t+n/2\Delta t} |w_n(\tau - t)x(\tau) - \bar{x}_t|^2} \quad (3)$$

Tabulka 1: Náhrady časově proměnné efektivní hodnoty.

Řádek (1): záznam zemětřesení [cm s^{-2}], řádek (2): záznam vibrací od dopravy [mm s^{-2}]

	RMS value	$a_e(t)$		spline		$T \cdot \text{RMS}$	$\int a_e(t) dt$	$\int a_{\text{spline}}(t) dt$
		max	average	max	average			
(1)	8.657	14.7242	7.94226	16.7163	7.93561	692.558	603.612	634.849
(2)	1.65673	7.6036	1.957	7.3416	1.956	99.404	117.212	117.146

Pro oba příklady vibrací je výpočet $a_e(t)$ vykreslen na obrázku 5a,b. Z těchto grafů je patrné, jak se liší rozptyl (efektivní hodnota) jako časově proměnná veličina vypočtená z jednotlivých úseků měřených záznamů (plná křivka) od jediné hodnoty, počítané z celého záznamu najednou (naznačeno tečkovaně). Délka úseků, z nichž se rozptyl počítá, však musí být volena s ohledem na charakter zkoumaného záznamu.

Jako kritérium pro posouzení vibrací podle příslušných předpisů pak může v některých případech sloužit integrál časového průběhu „efektivní hodnoty“, v jiných případech maximální hodnota či průměr hodnot přesahujících jistou mez. Pro uváděné případy je integrál časového průběhu „efektivní hodnoty“ vypsán v tabulce 1.

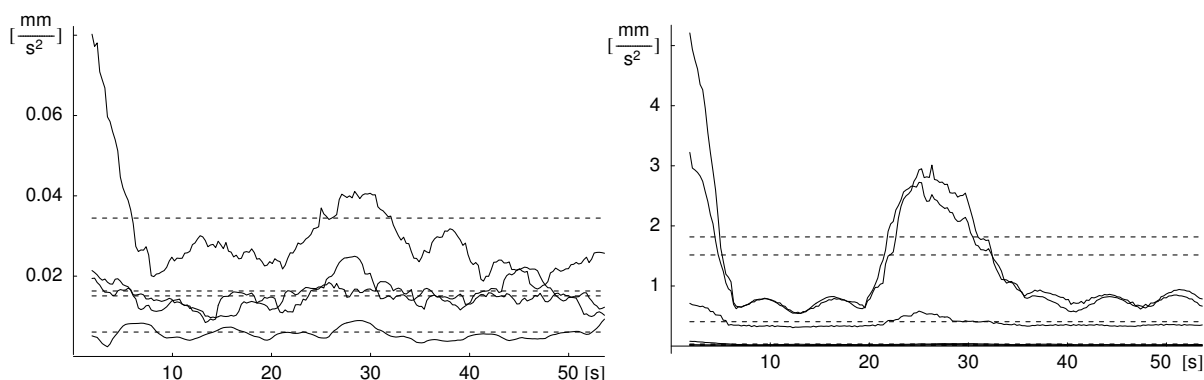
Jiným způsobem výpočtu průběhu „efektivní hodnoty“ může být proložení vhodné modulační funkce absolutní hodnotou zkoumaného záznamu tak, aby podílem původního záznamu a takové modulace byl záznam, který má rozptyl téměř konstantní a roven jedné. Pokud se v čase příliš nemění frekvenční obsah záznamu, bude odhad spektrální hustoty tzv. Welchovou metodou dobrý; modulace pak bude určovat časový průběh měřítka. Je ovšem vidět, že v případě záznamu zemětřesní, kde předpoklad stálosti spektra není splněn, je i takový postup nedostatečný.

Uvedený způsob výpočtu „efektivní hodnoty“ je ilustrován opět v grafech 5a,b, kde je čarokovanou čarou vyznačen kvadratický splajn, který byl proložen absolutními hodnotami zkoumaných záznamů.

Často je zapotřebí spočítat „efektivní hodnoty“ zrychlení odpovídající jistému frekvenčnímu rozsahu. Důvodem pro to může být jednak značná frekvenční nestacionarita spektra, jako je tomu například v případě uvedeného záznamu zemětřesení, a nebo z důvodů formálních, kdy například vyhláška a nařízení vlády 502/2000 předepisuje různé mezní hodnoty pro různé frekvence. Příklad takové analýzy vibrací budovy způsobené dopravou provedené pomocí waveletové MRA je na obrázku 6 a v tabulce 2.

Tabulka 2: Charakteristiky časově proměnných ekvivalentních hodnot pro jednotlivé složky rozkladu záznamu vibrací od dopravy pomocí waveletové MRA.

Frekvenční rozsah [Hz]	RMS [mm s^{-2}]	max $a_e(t)$ [mm s^{-2}]	avg $a_e(t)$ [mm s^{-2}]
0– 1.6	0.00608025	0.00929748	0.00559502
1.6– 3.2	0.016308	0.0249546	0.0157532
3.2– 6.4	0.0150838	0.0213997	0.0145394
6.4–12.8	0.0344611	0.0802546	0.0294741
12.8–25.6	0.405581	0.711461	0.386469
25.6–51.2	1.5163	3.22329	1.22617
51.2–102.4	1.81651	5.21037	1.2765



Obrázek 6: Časově proměnná efektivní hodnota jednotlivých složek MRA rozkladu záznamu vibrací způsobených dopravou. Nalevo: křivky pro frekvenční rozsahy 0–12Hz, napravo pro frekvenční rozsahy 12–100Hz, viz tabulka 2.

5. Závěr

Výskyt nestacionárních procesů je v inženýrské praxi běžný. Je-li však potřeba porovnat vyhodnocení záznamu takového jevu s normami a hygienickými předpisy, jsme záhy konfrontováni s omezením daným jedinou příslušnou hodnotou. Z výše uvedených odstavců plynou následující poznatky, které lze stručně a pro praktické účely formulovat takto:

- Nestacionární procesy není možno popsat jednou efektivní hodnotou (rozptylem). Je možné vypočíst časový průběh rozptylu, avšak v případě, kdy se v čase mění i spektrální vlastnosti procesu, je jeho vypovídací hodnota omezená.
- Podobně jako v případě okénkové Fourierovy transformace, je i zde před vyhodnocením realizace procesu potřeba vnést parametry zvenčí: volba délky a tvaru okénka pro výpočet proměnného rozptylu či interpretace časového průběhu efektivní hodnoty.
- V případě, kdy se efektivní hodnoty blíží mezním hodnotám předepsaným normou je třeba detailně posoudit způsob výpočtu, frekvenční obsah i další okolnosti, které na výsledek mají vliv.
- Waveletová MRA může pomoci rozlišit účinek jednotlivých frekvencí v případě, kdy se frekvenční spektrum v průběh záznamu mění.
- Metoda EMD, která je velmi účinným nástrojem pro zkoumání frekvenčně proměnného časového záznamu se pro tento typ úloh ukazuje jako nepříliš vhodná.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantů GA ČR 103/03/P080, 103/02/0020, jakož i díky podpoře projektů AV OZ 2071913, K2076106 a K2067107.

7. Literatura

- Bendat, J.S., Piersol A. (1993) *Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis*. Wiley and sons, Chichester.
- Cohen, L. (1995). *Time-Frequency Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- ČSN 730040. *Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva*. ČNI, 1995
- Ellis B.R., Evans A.P., Jeary A.P., Lee B. E.: *The wind induced vibration of tall building*. In: Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, IAHR/IUTA Symposium Karlsruhe, Editors: E. Naudasher and D. Rockwell, pp. 747-752, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1979
- Griffin M. J.: *Handbook of Human Vibration*. Academic Press. London, 1990
- Hansen R.J., Reed J. W., Vanmarke E. H.: *Human response to wind-induced motion of building*. Journal of structural division ASCE, Vol. 99, pp. 1589-1605, 1973
- Huang, E. N. et al. (1996) *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis*, Proc. of the Royal Soc., London, 454, pp. 903-995.

Malat, S. (1989) *Multiresolution approximation and wavelets*, Trans. Amer. Math. Soc., 315, pp. 69–88

Nařízení 502/2000 *Nařízení vlády ze dne 27. listopadu 2000 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.*

Stafford-Smith B., Coull A.: *Tall building structures: Analysis and Design*. Third Edition, J. Wiley and sons, New York, 1991