

ANALÝZA NAMĚŘENÝCH VIBRAČNÍCH PROJEVŮ V KOSTELNÍ VĚŽI

ANALYSIS OF MEASURED VIBRATION EFFECTS IN THE STEEPLE

Zdeněk Kaláb¹, Markéta Lednická²

Abstrakt

V tomto článku uvádíme vybrané výsledky experimentálního měření vibračních projevů dopravy, která je vedena poblíž kostela. Jedná se o evangelický kostel na Českobratrské třídě, který je významnou stavební památkou v centru Ostravy. Jde o církevní stavbu z roku 1907, na níž by vzhledem k současnému poškození zdiva mohly vibrace vyvolat rozvíjení puklin, případně vznik nových poškození. Měření bylo provedeno aparaturami GAIA se senzory ViGeo2 v kontinuálním režimu záznamu, a to v lodi kostela i v kostelní věži. Ačkoliv vibrace vyvolané dopravou jsou nevýznamné z hlediska možného poškození jmenované stavební památky, analýza záznamů prokázala existenci rezonančního kmitání kostelní věže. K hodnocení složek kmitání bylo využito waveletového rozkladu seizmického záznamu. Rezonanční kmitání se projevilo v rozsahu period 0,51 – 0,68 s.

Abstract

Selected results from experimental measurement of vibration effects generated by traffic are presented in this paper. Experiment was realised in evangelical church located on Ceskobratska street. This church is significant structural monument in the centre of Ostrava (Czech Republic). This church has been built in 1907 and vibration could evolved current failures and/or eventually origin of new failures. The measurement was performed using GAIA seismic recorders with ViGeo2 sensors; continuous record was used. Sensors were located both in church and steeple. Analysis of records confirmed resonant vibration of steeple although vibration generated by traffic are not significant from the viewpoint of possible damage of structural monument discussed above. Wavelet packet decomposition of seismic signals was used to evaluate vibration components. Resonant vibration was detected in period range 0.51 – 0.68 s.

Klíčová slova

rezonanční kmitání, waveletový rozklad, seizmický záznam

1 Úvod

Jednou z významných stavebních památek v Ostravě je evangelický kostel (obr. 1) na Českobratrské třídě (část Moravská Ostrava). Jde o církevní stavbu z roku 1907, která v sobě spojuje prvky gotiky, románského slohu a holandské renesance, ovlivněné secesí. Jednolodní halový kostel s mohutným klenutým vstupem do velké otevřené předsíně má hlavní fasádu členěnou pěti okenními osami. Průčelní fasáda je tvořena dvěma věžičkami, vpravo na ni navazuje mohutná věž se stupňovitými štíty a jehlovitou střechou. Fasáda věže je

členěna obloučkovým vlysem. Ke stavbě bylo použito režné cihlové zdivo. Příznačné pro tuto historizující architekturu je střídání nevýrazných lomených a valených oblouků (podle Malý průvodce stavebními památkami v Ostravě, nedatováno). Jedná se o objekt evidovaný v „seznamu památek ČR“.

V okolí kostela vedou místní komunikace, před kostelem pak je vedena jedna z hlavních komunikací spojujících „centrum Ostravy a Hladnov“ – Českobratrská třída. Na této třídě je významný dopravní ruch nejen osobních vozidel, ale také autobusové a trolejbusové dopravy. Cílem krátkodobého experimentálního měření vibrací v objektu kostela bylo posoudit možný vibrační vliv na konstrukci kostela vyvolaný dopravou. V některých částech zdiva jsou v současné době vidět praskliny (obr. 2). Příčiny vzniku těchto prasklin mohou být různé – stáří objektu, nedostatečná údržba technického stavu, podmáčení a další vlivy. Významnější seizmické zatížení objektu by mohlo způsobovat rozvíjení stávajících prasklin, případně vznik nových prasklin v oslabených místech.

2 Wavelet-paketový rozklad

K interpretaci naměřených digitálních seizmických signálů byla mj. zvolena diskretní waveletová transformace a wavelet-paketový rozklad (např. Mallat 1999, Klees a Haagmans 2000). S použitím této numerické metody zpracování signálů získali autoři řadu pozitivních výsledků, převážně při interpretaci záznamů důlně indukovaných seizmických jevů z Karvinska (např. Častová, Kaláb 2003, Častová et al. 1998, 2002, 2006).

Výhodou využití waveletové transformace v porovnání s běžně používanou Fourierovou transformací je především převedení vlnového obrazu seizmického záznamu na dílčí signály, které představují vibrace ve frekvenčních pásmech rozsahem na sebe navazujících. Protože se jedná o bezestrátový rozklad, součet všech dílčích signálů by poskytl původní signál. Podrobnější informace z teorie a využití waveletové transformace při zpracování signálů lze nalézt např. v Lyubushin (2007). Wavelet-paketový rozklad lze prezentovat buď jako jednotlivé signály v daných frekvenčních pásmech nebo jako 3D zobrazení. V tomto příspěvku je výhodnější použít první variantu, neboť případné rezonanční kmitání se projeví v příslušném pásmu.

Waveletová transformace se stává častou součástí mnohých zpracovatelských software, např. Matlab. V tomto příspěvku využíváme pro zpracování naměřeného signálu program Spectra Analyzer, vyvinutý prof. Lyubushinem z Moskvy (se kterým spolupracujeme v rámci společného tématu Ruské a České akademie věd). Stručný popis tohoto programu je uveden např. ve společné publikaci Kaláb et al.



Obr. 1 Evangelický kostel na Českobratrské třídě v Ostravě

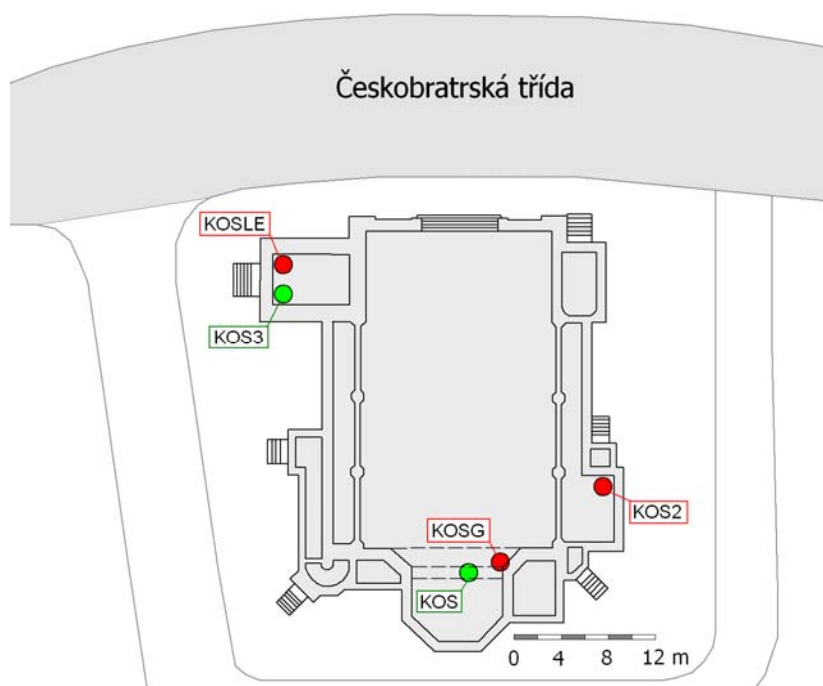


Obr. 2 Stávající praskliny ve zdivu kostela

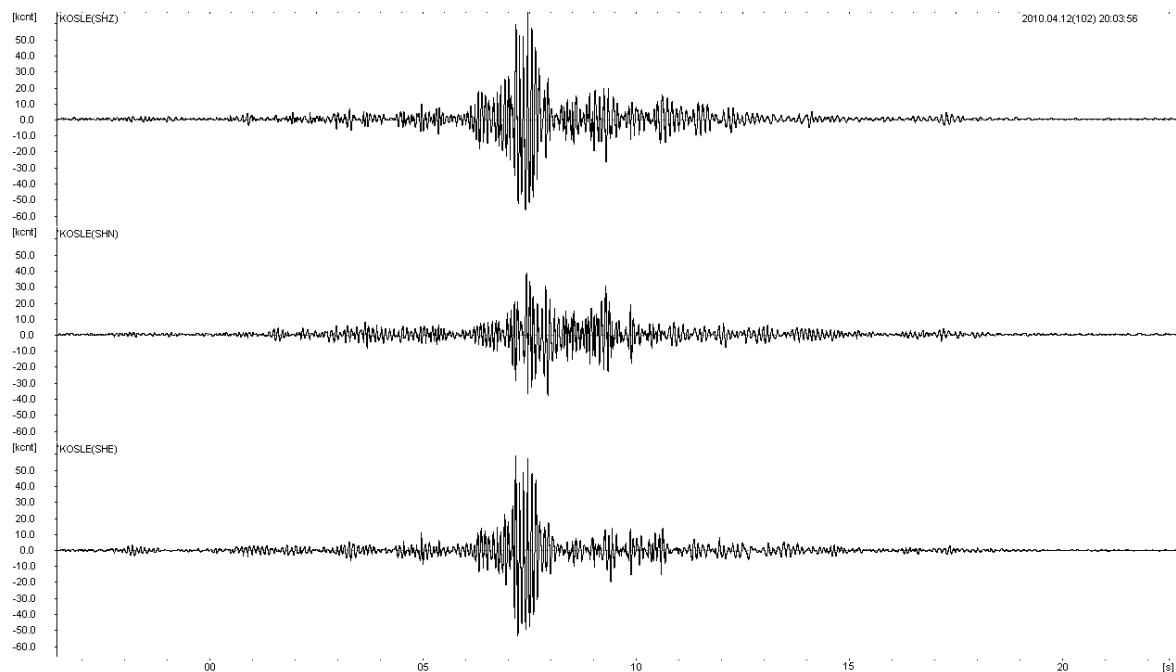
(2011). Parametry programu a signálu (vzorkovací frekvence zpracovávaného signálu, počet a rozsah frekvenčních hladin rozkladu, typ použitého mateřského waveletu, frekvence nevzorkovaného signálu atd.) jsou stanovovány interpretátorem v závislosti na požadovaném výstupu zpracování a parametrech naměřeného vstupního signálu. Musí být zachována obecná pravidla, např. Nyquistovo kritérium a Shannonův vzorkovací teorém.

3 Experimentální měření

Vlastní experimentální měření proběhlo v období od 12. 4. 2010 do 16. 4. 2010. K měření byly použity autonomní seizmické stanice typu GAIA od firmy VISTEC Praha. Tyto měřicí stanice poskytují digitální záznamy třísložkových dat. Dynamický rozsah aparatury je až 138 dB, vzorkovací frekvence digitálního záznamu až 500 Hz. Čas řídicího systému stanice může být synchronizován pomocí systému GPS (světový čas) prostřednictvím aktivní antény. Použity byly rychlostní krátkoperiodické senzory typu ViGeo2. Orientace vodorovných složek senzoru při uváděném měření byla paprsková, tj. osa N byla orientována kolmo na Českobratrskou třídu, osa E byla rovnoběžná s touto třídou a osa Z měří kmitavý pohyb ve svislém směru.



Obr. 3 Půdorys kostela s vyznačením jednotlivých stanovišť při komentovaném měření vibračních projevů.



Obr. 4 Vlnový obraz maximálního naměřeného projevu dopravy na referenčním stanovišti (KOSLE). Na vodorovné ose je vynesena čas v [s], na svislé ose je vynesena hodnota rychlosti kmitání v kvantovacích úrovních ($106 \text{ cnt} = 2,975 \text{ mm.s}^{-1}$).

Jednotlivá stanoviště (obr. 3) byla zvolena tak, aby poskytla dostatek informací v případě, že by objekt kostela byl dopravou seizmicky významně zatěžován:

- stanoviště „KOSG“ na kamenném schodě v lodi kostela pod kazatelnu (podlaha je nad úrovní okolního terénu)
- stanoviště „KOS2“ na dlažbě u bočního vchodu do kostela (nalevo při pohledu na oltář)
- stanoviště „KOS“ na štítové zdi nad oltářem v úrovni krovu
- stanoviště „KOSLE“ na dlažbě v nejnižší přístupné úrovni věže, podlaha opět nad okolním terénem
- stanoviště „KOS3“ na betonové podlaze ve zvonici

Stanoviště KOSLE na dlažbě v nejnižší přístupné úrovni věže můžeme považovat za referenční stanoviště ve smyslu normy 73 0040. Toto stanoviště bylo situováno nejbližše Českobratrské ulice. Maximální vibrační projev (obr. 4), tj. maximální hodnota rychlosti kmitání, byl zaznamenán dne 12. 4. 2010 v 22:04 (LSEČ) a měl následující hodnoty:

- složka svislá – $0,20 \text{ mm.s}^{-1}$
- složka vodorovná (N) – $0,114 \text{ mm.s}^{-1}$
- složka vodorovná (E) – $0,174 \text{ mm.s}^{-1}$

Hodnoty na ostatních stanovištích na podlaze kostela byly nižší. Pouze rezonanční odezva na tento projev ve zvonici a na štítové zdi dosáhly na vodorovné složce hodnoty téměř $0,5 \text{ mm.s}^{-1}$. Vzhledem k velmi nízkým naměřeným maximálním hodnotám nelze provést detailnější interpretaci záznamů. Provedeme-li zhodnocení našich naměřených výsledků (je nutno upozornit, že šlo pouze o krátkodobé měření), lze předpokládat, že měřené vibrace nezpůsobují poškození na objektu. Vzhledem k naměřeným maximálním hodnotám lze také předpokládat, že vibrace zřejmě nezpůsobují rozvíjení existujících trhlin nebo vznik nových trhlin v oslabených místech.

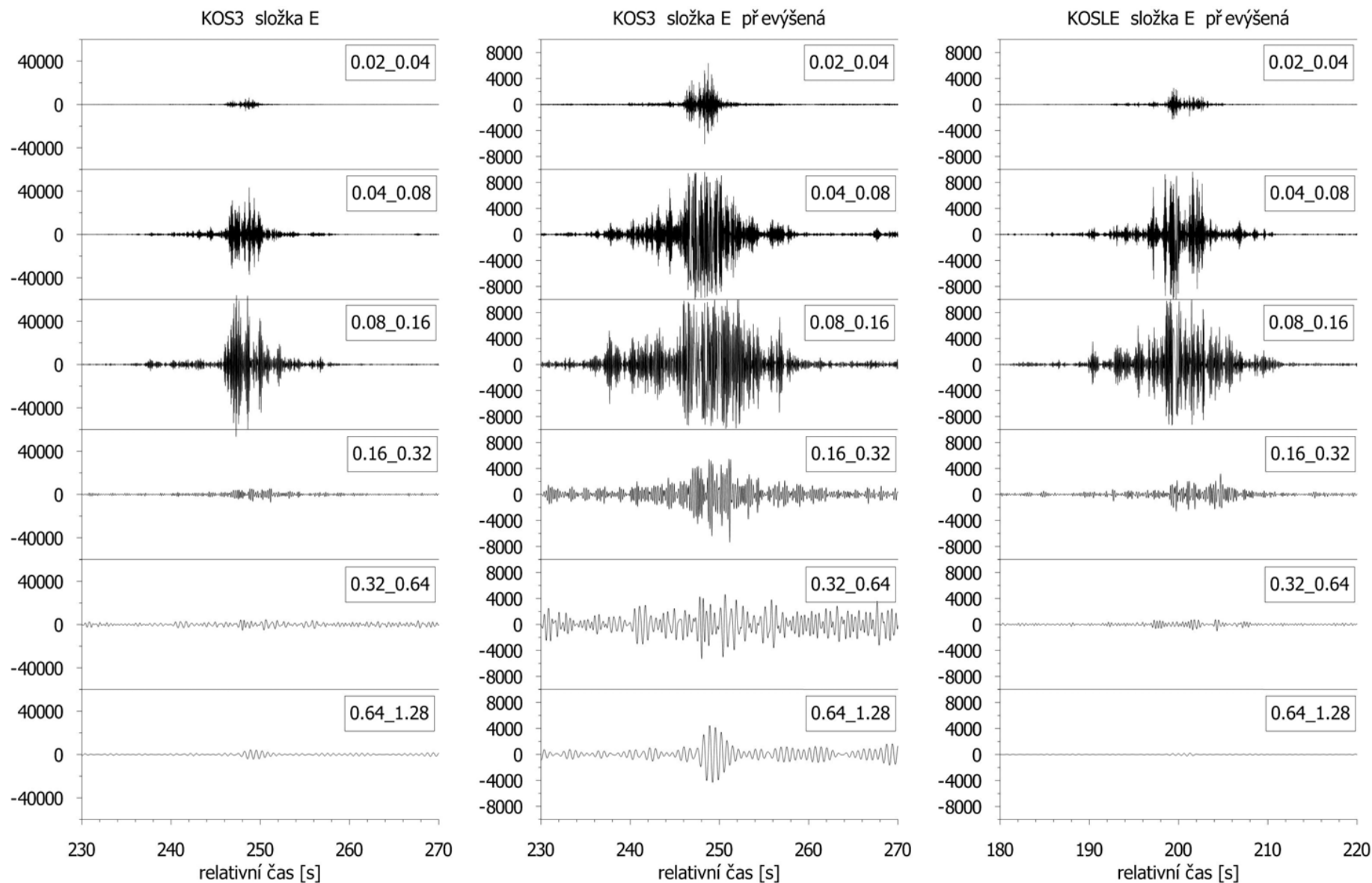
4 Interpretace rezonanční frekvence věže

Pro interpretaci rezonanční frekvence věže bylo využito waveletového rozkladu digitálního záznamu naměřeného seizmického signálu, a to pomocí speciálního programu Spectra Analyzer, jehož stručný popis je uveden např. v publikaci Kaláb et al. (2011). Popsaný příklad představuje rozklad vodorovné složky E (složka rovnoběžná s komunikací) výše uvedeného záznamu s nejintenzivnějším projevem dopravy. Pro waveletový rozklad byly použity záznamy naměřených seizmických signálů ze dvou stanovišť – „KOSLE“ na dlažbě v nejnižší úrovni věže a „KOS3“ na betonové podlaze ve zvonici. Naměřený signál o vzorkovací frekvenci 250 Hz byl převzorkován pomocí programu Spektra analyzer na 100 Hz a dále byl proveden waveletový rozklad do deseti základních hladin. Převzorkování dat na nižší vzorkovací frekvenci v tomto případě signál pro analýzu nijak neznehodnotí. Při vzorkovací frekvenci 100 Hz získáme waveletovým rozkladem informace o frekvencích nižších jak 50 Hz, což je v tomto případě hodnocení odezvy od dopravy dostačující. Na obr. 5 je shora dolů uvedeno šest vybraných po sobě následujících hladin provedeného waveletového rozkladu. Tyto hladiny představují rozložený signál v jednotlivých rozsazích period, a to 0,02 – 0,04 s; 0,04 – 0,08 s; 0,08–0,16 s; 0,16 – 0,32 s; 0,32 – 0,64 s; 0,64 – 1,28 s. Na vodorovné ose je vynesena relativní čas v [s], na svislé ose je vynesena hodnota rychlosti kmitání v kvantovacích úrovních ($106 \text{ cnt} = 2,975 \text{ mm.s}^{-1}$).

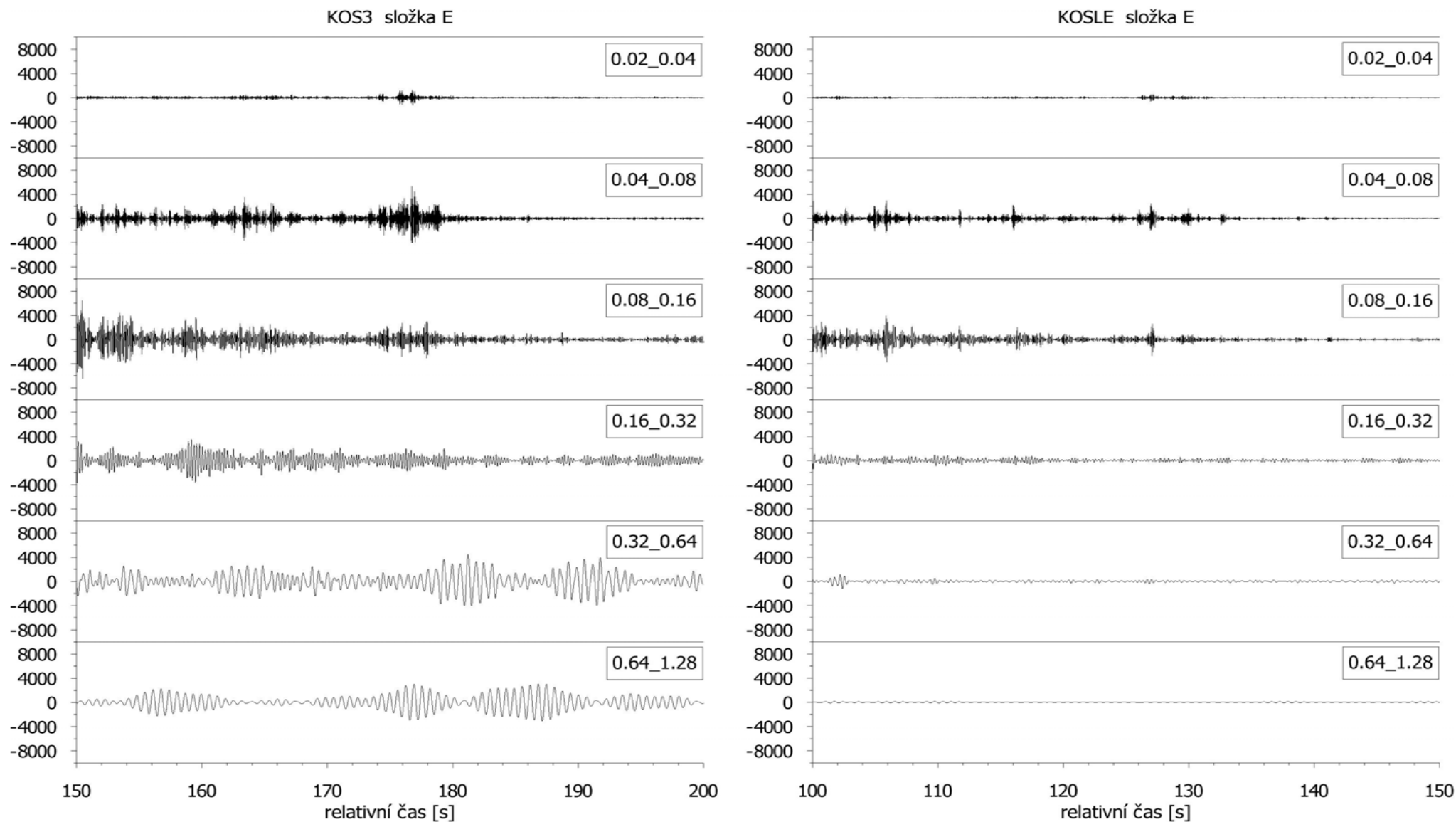
Protože zpracovatelský software neumožňuje vynášení měřených hodnot rychlosti kmitání ve fyzikálních jednotkách, jsou grafy vyneseny v kvantovacích úrovních (přepočít by v obrázcích způsobil označení necelých hodnot na osách). V levé třetině obrázku je rozklad signálu naměřeného na podlaze ve zvonici. Zde jsou osy rychlosti kmitání normovány na maximální amplitudu ze všech frekvenčních hladin, tj. $0,18 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Z obrázku je vidět, že nejvýznamnější projev je pozorovatelný na hladinách obsahujících vibrace v periodách $0,08 - 0,16 \text{ s}$ a dále $0,04 - 0,08 \text{ s}$. Ostatní hladiny obsahují vibrace se srovnatelnými hodnotami amplitud, které jsou mnohem nižší. Prostřední rozklad (Obr. 5) zobrazuje totéž jako obrázek vlevo s tím, že osy rychlosti kmitání jsou normovány na zvolenou hodnotu $0,02975 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Toto zobrazení je nezbytné pro lepší čitelnost hladin s nízkými hodnotami amplitud rychlosti kmitání, v našem případě zvláště hladiny s nízkými hodnotami frekvencí, na nichž lze očekávat rezonanční odezvu věže. Na hladinách $0,08 - 0,16 \text{ s}$ a $0,04 - 0,08 \text{ s}$, však došlo k pozměnění záznamu v důsledku překročení zvoleného měřítka (ořezání), ale tyto hladiny zde nejsou hodnoceny. Harmonické kmitání, které je zřetelné především na hladině $0,64 - 1,28 \text{ s}$ (tj. přibližně $0,78 - 1,56 \text{ Hz}$), zřejmě představuje hledané rezonanční kmity. Tyto kmity trvají krátkou dobu a jsou sledovatelné víceméně pouze během maximálního projevu průjezdu vozidla. Pro porovnání je na obrázku vpravo (obr. 5) uveden rozklad stejné složky signálu téhož děje zaznamenaného na stanovišti v nejnižší úrovni věže. Jednotlivé hladiny jsou opět pro lepší čitelnost na ose rychlosti kmitání normovány na hodnotu $0,02975 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. V tomto případě lze konstatovat, že projev průjezdu vozidla je v příslušných hladinách ($0,08 - 0,16 \text{ s}$ a $0,04 - 0,08 \text{ s}$) srovnatelný s projevem ve zvonici. Harmonické kmitání s nízkými hodnotami frekvencí, které bylo detekováno v signálu ze zvonice, zde pozorovatelné není.

Stejný metodický postup rozkladu signálu byl použit také na záznam seizmického šumu (bez projevu dopravy), ve kterém bylo vizuálně identifikováno harmonické kmitání na záznamu ze zvonice. V levé části obr. 6 jsou jednotlivé frekvenční hladiny získané ze záznamu ve zvonici, v pravé části ze záznamu v nejnižší úrovni věže. Zatímco na záznamu ze spodní části věže nelze žádné rezonanční kmity pozorovat, na záznamu ze zvonice se v tomto případě objevují významné harmonické kmity opět na hladině $0,64 - 1,28 \text{ s}$ a také na hladině $0,32 - 0,64 \text{ s}$. Domníváme se, že se jedná o projev rezonančního kmitání věže, pravděpodobně v důsledku vanutí větrů.

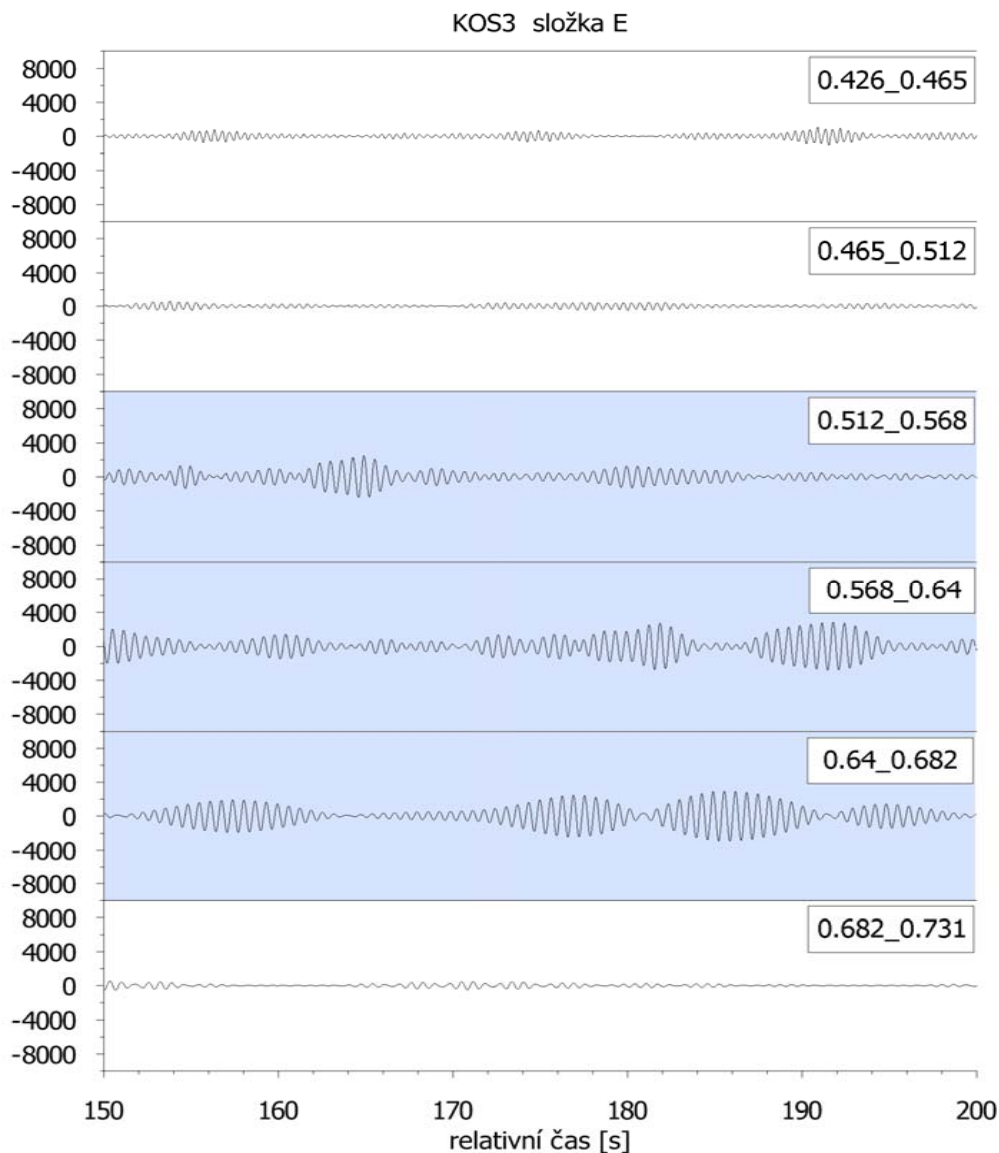
Rezanční kmitání, které se ve frekvenčních hladinách waveletového rozkladu projevuje charakteristickým tvarem (plynule narůstající a tlumící se harmonický signál), by se ve spektru projevilo pouze frekvenčním píkem. Nebylo by však možno stanovit časový interval tohoto projevu. Vzhledem k tomu, že se hledané rezonanční kmitání věže objevilo ve stejné míře na dvou sousedních hladinách, je možné, že perioda hledaných kmitů leží na rozhraní mezi těmito hladinami. Aby bylo možné přesněji definovat periodu harmonického kmitání, byl proveden nový rozklad záznamu šumu ze zvonice do celkem 40-ti hladin. Vybrané hladiny tohoto podrobnějšího rozkladu jsou uvedeny na obr. 7. Jedná se o šest hladin v okolí předpokládané periody hledaných kmitů $0,64 \text{ s}$. Na základě tohoto podrobnějšího rozkladu signálu je vidět, že převládající kmity leží v rozsahu period $0,512 - 0,682 \text{ s}$. Po sloučení těchto tří hladin do jednoho záznamu (obr. 8) můžeme sledovat rezonanční kmitání konstrukce věže, tj. rozsah frekvencí $1,47 - 1,95 \text{ Hz}$. Stanovení vlastních kmitů objektu je obecně složitou záležitostí, neboť vyžaduje velmi detailní popis nejen tvaru a jednotlivých prvků konstrukce, ale též dobrou znalost fyzikálních, pevnostních a pružnostních vlastností jednotlivých prvků, jejich spojů, rozložení hmot v objektu, změnu vlastností v důsledku stárnutí. Jednoduché vztahy pro výpočet period vlastního kmitání konstrukce uváděné v některých odborných člancích mají velmi omezené použití.



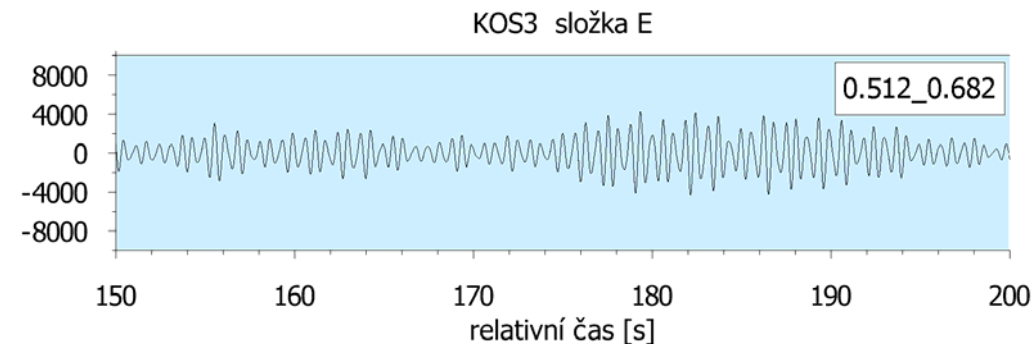
Obr. 5 Waveletový rozklad maximálního naměřeného projevu dopravy ze stanoviště KOS3 a KOSLE. Shora dolů je uvedeno šest po sobě jdoucích hladin, které odpovídají příslušným rozsahům period v [s]. Na vodorovné ose je vyneseno relativní čas v [s], na svislé ose je vynesena hodnota rychlosti kmitání v kvantovacích úrovních ($10^6 \text{ cnt} = 2,975 \text{ mm.s}^{-1}$); podrobný popis obrázku je uveden v textu.



Obr. 6 Waveletový rozklad záznamu šumu ze stanoviště KOS3 a KOSLE. Shora dolů je uvedeno šest po sobě jdoucích hladin, které odpovídají příslušným rozsahům period v [s]. Na vodorovné ose je vyneseno relativní čas v [s], na svislé ose je vynesena hodnota rychlosti kmitání v kvantovacích úrovních ($10^6 \text{ cnt} = 2,975 \text{ mm.s}^{-1}$); podrobný popis obrázku je uveden v textu.



**Obr. 7 Waveletový rozklad záznamu šumu ze stanoviště KOS3.
Popis viz obr. 6.**



**Obr. 8 Signál vzniklý po sloučení tří hladin z obr. 7 v rozsahu
0,512 – 0,682 s. Popis viz obr. 6.**

5 Závěr

V článku jsou stručně popsány výsledky experimentálního měření seizmického zatížení jednoho z kostelů v Ostravě. Lze konstatovat, že vibrace vyvolané dopravou po komunikaci před kostelem mají velmi slabý projev, tudíž zřejmě nepoškozují kostelní zdivo.

Waveletový rozklad naměřených digitálních signálů ze spodní části věže a její zvonice identifikoval slabé rezonanční kmitání na zvonici, především na frekvenční hladině 1,47 – 1,95 Hz. Toto kmitání bylo pozorováno především na záznamech šumů (např. při vanutí větrů). Protože toto rezonanční kmitání je na dané hladině srovnatelné s projevem získaným na záznamech průjezdy vozidel, můžeme konstatovat, že kmity vyvolané průjezdy vozidel nezpůsobují významnější rezonanční odezvu věže.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za částečné finanční podpory GAČR 103/09/2007 Vliv technické a přírodní seizmicity na statickou

spolehlivost a životnost staveb a Výzkumný záměr řešený na ÚGN AVOZ30860518.

Literatura

- ČASTOVÁ, N., KALÁB, Z., KUČERA, R. Waveletová transformace a rozklad typových seismických signálů. In *Kaláb Z. -ed.: Současné směry v seismologii a inženýrské geofyzice. Sborník referátů regionální konference*, Ústav geoniky AV ČR, 1998, Ostrava, p. 126–131.
- ČASTOVÁ, N., KALÁB, Z. Waveletový rozklad seismologických signálů. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební, 12. Regionální konference Nové výsledky seismologických, geofyzikálních a geotechnických průzkumů*, roč. III, č. 2, 2003, p. 51–60.
- ČASTOVÁ, N., KALÁB, Z., LYUBUSHIN, A. A. Diskrete wavelet transform analysis of digital records of seismic signals, *Aplimat*, 2002, Bratislava.
- ČASTOVÁ, N., KALÁB, Z., HORÁK, D. Singulární rozklad wavelet paketů seismických signálů. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební*, roč. VI, č. 2, 2006, p. 33–44.
- MALLAT, S. *A wavelet tour of signal processing*. Academic press, 1999, San Diego, London, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto.
- VIDAKOVIC, B. *Statistical Modeling by Wavelets. Wiley series in probability and statistics*, 1999, New York.
- KLEES, R., HAAGMANS, R. – eds. *Wavelets in the Geosciences*. Springer, 2000, 241 p.
- KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., KOŘÍNEK, R.: *Experimentální měření seismických projevů vibrací vyvolaných dopravou v okolí evangelického kostela v Moravské Ostravě*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, FAST, 2010, interní zpráva, 6 s.
- KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., LYUBUSHIN, A. A.: Processing of mining induced seismic events by spectra analyser software. *Górnictwo i geologia. Kwartalnik*, Tom. 6, z. 1, Gliwice, 2011, p. 75 – 83.
- LYUBUSHIN, A.A.: *Geophysical and Ecological Monitoring Systems Data Analysis*, 2007, Nauka, Moscow, 228 pages (in Russian).

Autoři

¹ prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc. – VŠB-TU Ostrava, FAST, L. Poděště 1875, 708 33 Ostrava-Poruba, též: Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, kalab@ugn.cas.cz

² Ing. Markéta Lednická, Ph.D. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, lednicka@ugn.cas.cz