

**Zdeněk KALÁB<sup>1</sup>, Miroslav PINKA<sup>2</sup>**

**ANALÝZA ZÁZNAMŮ TECHNICKÉ SEIZMICITY POMOCÍ WAVELETOVÉ  
TRANSFORMACE – PAKETOVÉHO ROZKLADU**

**ANALYSIS OF TECHNICAL SEISMICITY RECORDS USING WAVELET TRANSFORM –  
PACKET DECOMPOSITION**

**Abstrakt**

Článek představuje výsledky analýzy digitálních záznamů technické seizmicity. Výsledky jsou ukázány na svislých složkách záznamů vibrací vyvolaných například beraněním piloty nebo hutněním šterkového podkladu. K analýze je použit paketový rozklad do 16 frekvenčních hladin, který je založen na waveletové transformaci digitálních signálů s využitím ortogonální Daubechiovské mateřské báze SYM 20.

**Klíčová slova**

Waveletová transformace, paketový rozklad, SYM20, digitální záznamy, technická seizmicita.

**Abstract**

Analysis results of digital records of technical seismicity are presented in this paper. These results are shown on vertical components of signals generated e.g. by pile driving or compaction of graveled base. Packet decomposition into 16 frequency ranges is used for analysis; these decompositions are based on wavelet transform of digital signals using orthogonal Daubechies mother base SYM 20.

**Keywords**

Wavelet transform, packet decomposition, SYM20, digital record, technical seismicity.

## 1 ÚVOD

Na starších stavebních objektech, zvláště zděných, můžeme často pozorovat trhliny následkem dynamické odezvy stavby na technickou seizmicitu. Tyto trhliny lze pozorovat především ve svislých nosných, případně ve stropních konstrukcích, lze nalézt praskání okenních tabulí atd. [20]. Technická seizmicita je pojem shrnující vibrace způsobené stroji, nářadím, dopravními prostředky a lidskou činností, nejvýznamnější projevy jsou projevy trhacích prací a indukované seizmicity [např. 5, 18].

Charakter vyvolaných vibračních projevů této seizmicity je různý. Jde o obecně známé sinusové a složené sinusové jevy, dále pak o stacionární náhodné, nestacionárně náhodné jevy a pulzy. Pro posouzení možných negativních vlivů vibrací na stavby, případně na člověka, je nutné znát hodnoty převládajících (nosných) frekvencí, k čemuž se tradičně používá Fourierova transformace (spektrální analýza pomocí FT). Waveletová transformace (WT) poskytuje oproti

---

<sup>1</sup> Prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 942, e-mail: zdenek.kalab@vsb.cz.

<sup>2</sup> Ing. Miroslav Pinka, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 948, e-mail: miroslav.pinka@vsb.cz.

Fourierově transformaci informací o časové lokalizaci spektrálních složek. FT také není vhodná pro analýzu nestacionárních signálů, neboť využívá sinusové funkce pro rozklad signálů a je proto vhodná především pro popis periodických signálů. WT nabízí nový přístup k analýze signálů použitím speciálního filtru nazvaného wavelet. V příspěvku jsou představeny výsledky použití paketového rozkladu waveletové transformace. Cílem je ukázat možnost a vlastnosti rozkladů vybraných signálů technických vibrací, které jsou příkladem zpravidla nestacionárních signálů. Rozklady umožňují následné detailnější zpracování signálu ve frekvenčních hladinách.

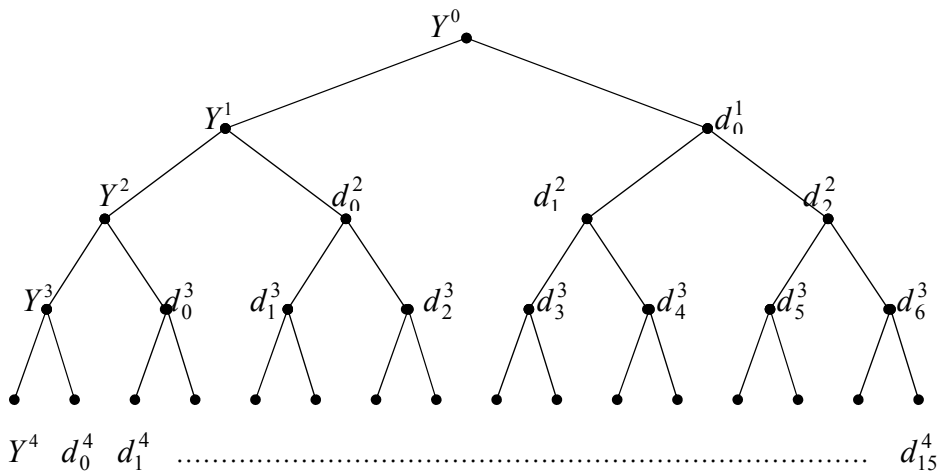
## 2 WAVELETOVÁ TRANSFORMACE

K popisu waveletové transformace potřebujeme složitější matematický aparát, jehož základem je tzv. víceúrovňová analýza – multirozklad. Proto pro podrobné studium této diskrétní transformace odkazujeme na literaturu, např. Horák [4]. Dnes jsou waveletové transformace (množina waveletových transformací) velmi rozšířené a používají se při rozkladu, analýze a syntéze signálů různého původu (optické, akustické, řečové apod.), při analýze a řešení úloh spojených s identifikací objektů (např. v lékařství, v geofyzice a v meteorologii), při analýze turbulentních polí, pro ztrátovou i bezztrátovou komprimaci dat (jedno i vícerozměrných) a také při řešení úloh spojených s řešením soustav algebraických a diferenciálních rovnic (parciálních diferenciálních rovnic). První použití waveletové transformace v geofyzice a zavedení termínu „wavelet“ bylo provedeno Grossmannem a Morletem [3] při analýze seizmických a akustických signálů. Teorie waveletů si postupně našla místo v různých aplikacích, mj. i v geofyzice a seizmickém inženýrství [např. 12, 13, 10, 7, 2].

Jednou z procedur waveletové transformace, která poskytla pozitivní výsledky v oblasti zpracování seizmologických dat, je paketový rozklad seizmologického signálu. Princip paketového rozkladu signálu je na obr. 1 – binární graf (pyramidální algoritmus pro komprimovaný signál i doplněk). Signál  $Y^0$  je rozložen na dvě části –  $Y^1$  - komprimovaný signál (aproximace signálu, trendová část) na první hladině rozkladu,  $d_0^1$  - ortogonální doplněk na první hladině, který zachycuje odlišnosti („jemnosti“). Zapišeme-li pro přehlednost jako horní index, index hladiny, a dolní index bude indexem uvnitř hladiny, pak výstup na druhé hladině bude  $Y^2, d_0^2, d_1^2, d_2^2$ , přičemž  $Y^2$  je aproximační část, charakterizující dolní čtvrtinu frekvencí (nejnižší),  $d_0^2$  je doplňková část po druhém rozkladu a charakterizuje druhou čtvrtinu frekvencí,  $d_1^2$  je aproximační část prvního doplňku a charakterizuje třetí čtvrtinu frekvencí,  $d_2^2$  je doplňková část prvního doplňku a charakterizuje čtvrtou (poslední) čtvrtinu frekvencí, tj. nejvyšší frekvence. Stručně lze formulovat, že se jedná o transformaci signálu z 2-D oblasti (časově-amplitudové) do 3-D oblasti (časově-frekvenčně-amplitudové). Je možné si zjednodušeně představit, že jsme použitím waveletové transformace signál „rozfiltrovali“ do několika frekvenčních na sebe navazujících „hladin“ [např. 1].

První krok při zpracování signálů pomocí waveletové transformace vyžaduje výběr optimálního waveletu a waveletovské báze. To lze provést náhodným výběrem nebo s využitím numerického ocenění signálu, např. pomocí jeho entropie [13]. Výběr waveletové báze je velmi důležitý a ovlivňuje výsledky zpracování. Obvykle se waveletová báze volí tak, aby se co nejvíce podobala zpracovávanému signálu, tj. lépe zachycuje frekvence. Při okenní transformaci jsou odstraněny vysoké frekvence (dochází k vyhlazení), zatímco u waveletové transformace jsou zachyceny všechny frekvence. Waveletová transformace se hodí jak pro stacionární, tak pro nestacionární signály [podle 4].

Označíme-li nejvyšší možnou frekvenci  $F_N$  (Nyquistovu), odpovídající základnímu oknu  $\Delta T = \frac{1}{F_N}$ , pak přechod z jedné hladiny na druhou lze ve frekvenční oblasti vyjádřit  $\frac{F_N}{2^j}$ ,  $j=1, 2, \dots, k$  (v našem případě  $k=16$ , zobrazeny nejsou vždy všechny frekvenční hladiny, nejnižší frekvenční hladiny neposkytují vzhledem k rozsahu senzorů reálné hodnoty). Přechod z jedné do druhé hladiny tedy zachycuje frekvence z intervalu  $\left\langle \frac{F_N}{2^{j-1}}; \frac{F_N}{2^j} \right\rangle$ .



Obr. 1 Schéma paketového rozkladu signálu

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ DATA A INTERPRETACE

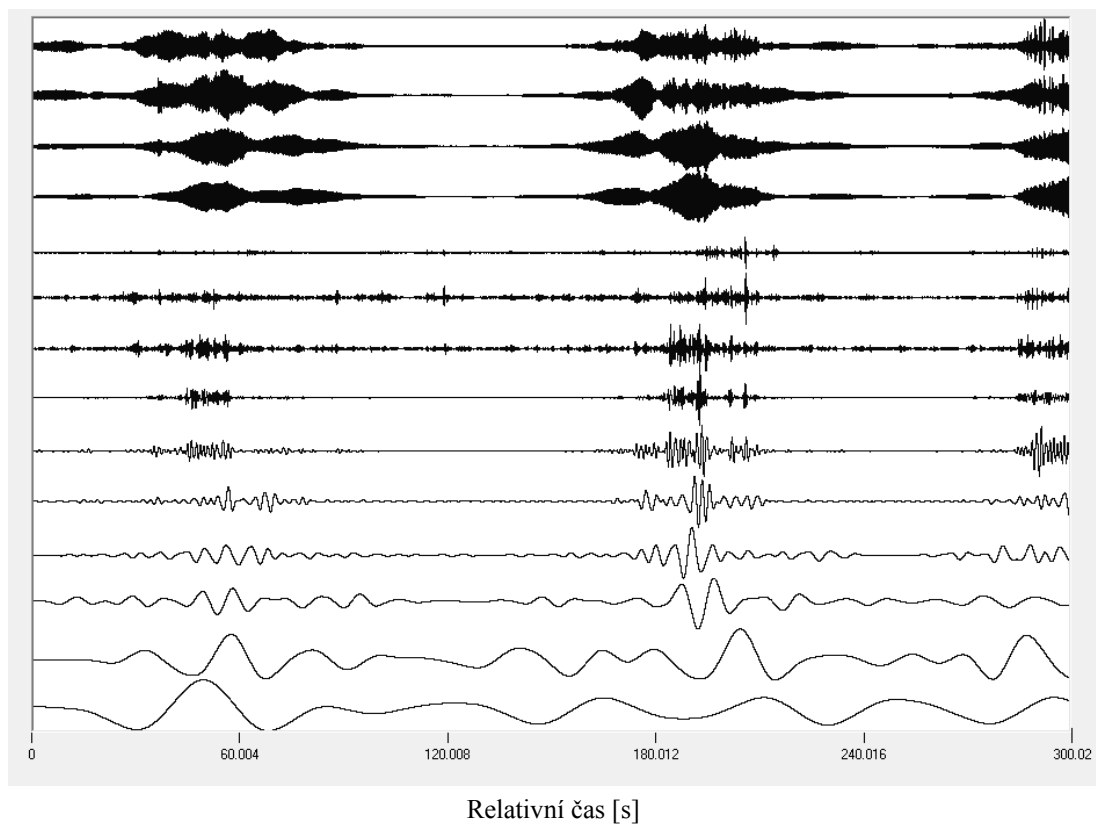
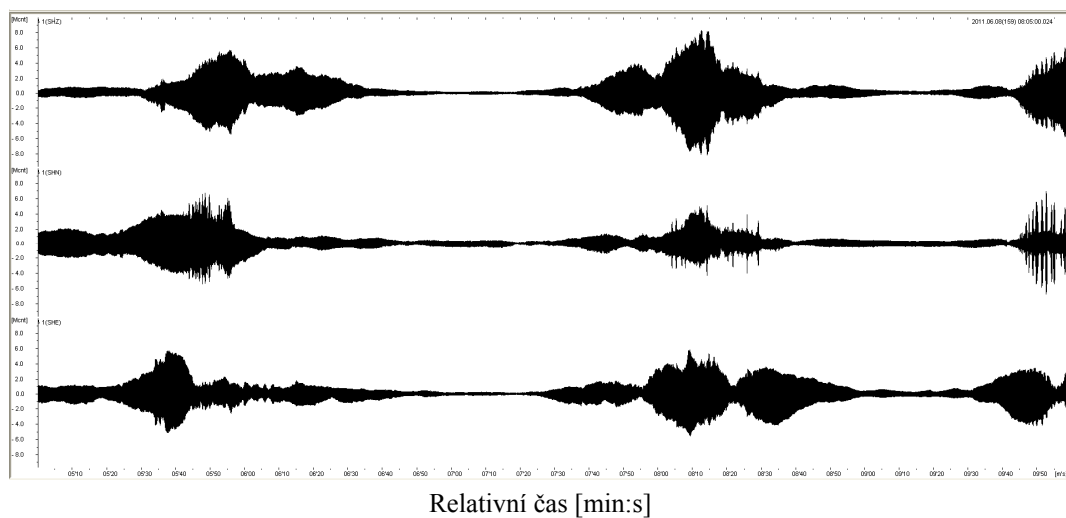
Experimentální data – seizmologické signály – pocházejí z vlastních měření, která byla realizována aparaturami typu GAIA s tříoskovými senzory Le3D nebo ViGEO2. Frekvenční rozsah seizmického kanálu byl ve všech případech nejméně 2 – 80 Hz, vzorkovací frekvence 500 Hz.

Paketový rozklad našich dat je založen na waveletové transformaci digitálních signálů s využitím ortogonální Daubechiesové báze SYM 20. Je využito počítačového programu SpectraAnalyzer, který byl vyvinut prof. A. Lyubushinem, IFZ Moskva, z Ruské akademie věd; popis programu je v referenční příručce a článku Kalába et al. [8]. Frekvenční hladiny jsou (na obrázcích shora dolů) definována následujícími intervaly: 250-125, 125-62,5, 62,5-31,25, 31,25- 15,625, 15,625-7,8125, 7,8125- 3,90625, 3,90625-1,95, 1,95-0,98, 0,98-0,49, 0,49-0,245, 0,245-0,1225, 0,1225-0,0612, 0,0612-0,03, 0,03-0,015 [všechny hodnoty v Hz]. Na vodorovné ose rozkladů je relativní čas v [s], na svislé ose jsou tzv. waveletové koeficienty (závisí na použité waveletové bázi, pro náš účel nejsou hodnoty podstatné, a proto nejsou uváděny).

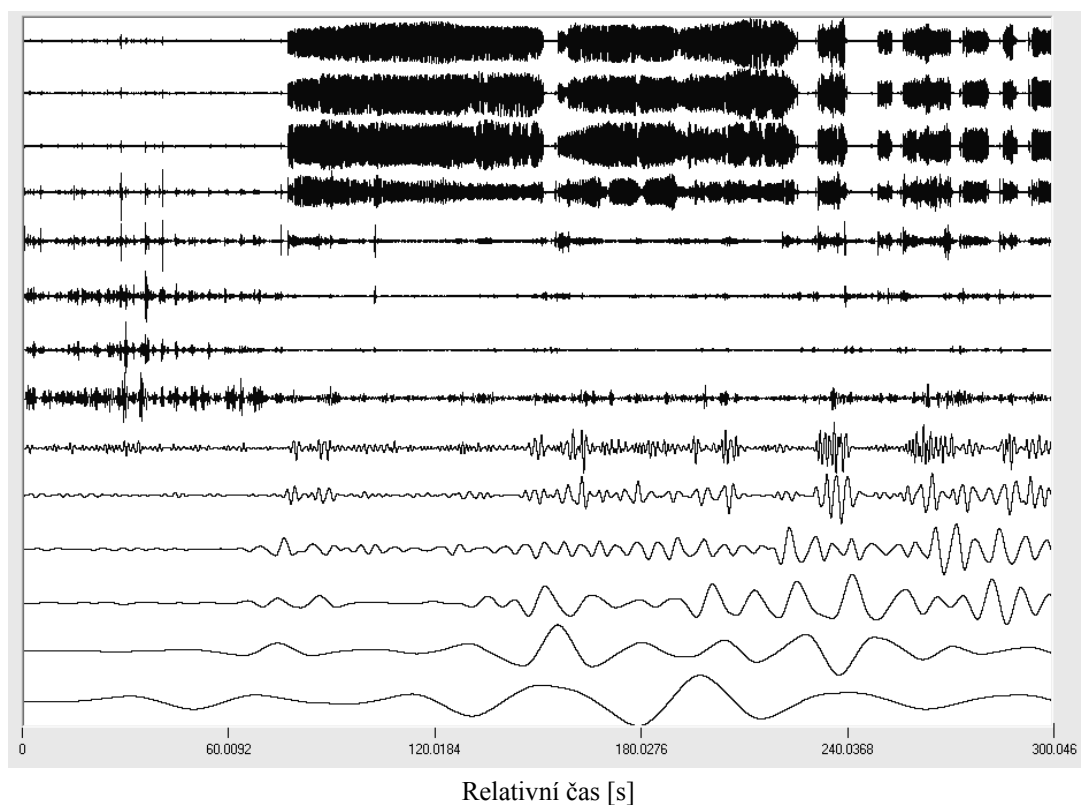
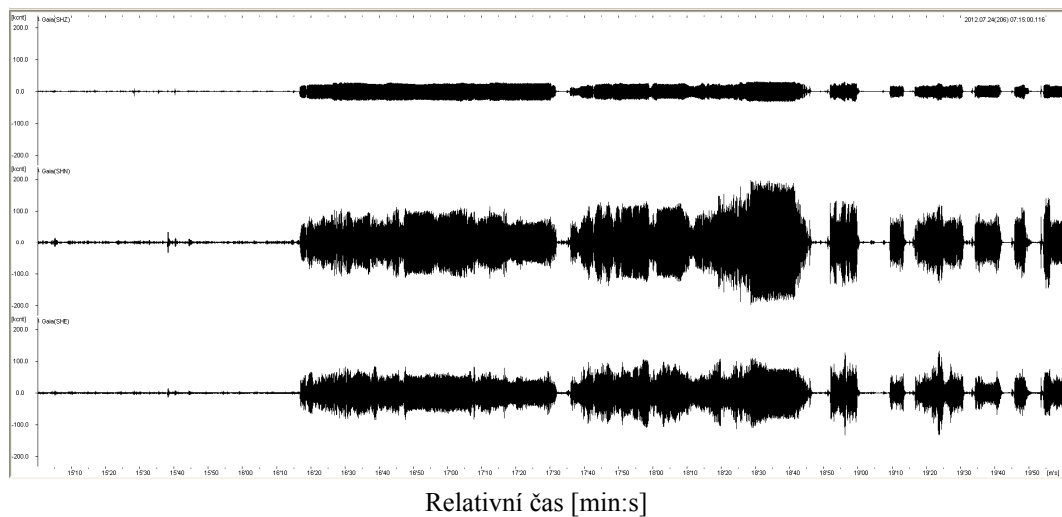
První příklad představuje interpretaci záznamu vibrací vyvolaných vibračním válcem při hutnění šterkového podkladu. Základní interpretaci tohoto měření v amplitudové oblasti prezentoval Pinka [15]. Zpracovávaná část záznamu o délce 300 s je na obr. 2 (nahore), shora dolů složky záznamu v pořadí svislá, vodorovná N-S a vodorovná E-W, paketový rozklad svislé složky je na obr. 2 (dole). Rozklad ukazuje v souladu s vlnovým obrazem významná kmitání ve třech časových obdobích záznamu. Z rozkladu je zřejmé, že jde o signály se širokým rozsahem frekvencí, a to od 250 Hz do 15 Hz. V časovém období okolo 200 s je detekovatelné významnější kmitání na frekvencích 0,5 Hz - 0,1 Hz; tento interval však s ohledem na frekvenční rozsah daného měření nemusí být přesný. Frekvenční spektrum (použitím FT) tohoto signálu, kromě toho že neposkytuje informaci o časech největších projevů, ukazuje dominantní frekvenci pouze na hodnotě cca 27 Hz a vyšších násobcích této hodnoty.

Na obr. 3 (nahore) je cca pětiminutový záznam vibračních projevů vyvolaných demoličním kladivem při práci v tunelu Jablunkov. Zde po havárii tunelu při rekonstrukci zůstala část tunelu stát s již vybudovaným definitivním ostěním. Druhá část byla provizorně zajištěna betonovou zátkou a těžkým mostním bedněním. K odstranění zátky byla použita kombinace trhacích prací a hydraulického bouracího kladiva [např. 16]. Vzhledem k podobnému charakteru vyvolaných vibrací, paketový rozklad (obr. 3 dole) tohoto signálu má velmi podobný charakter. Frekvenční analýza tohoto signálu dokládá dominantní frekvenci na hodnotě cca 70 Hz. V obou dosud uvedených příkladech paketový rozklad „upozornil“ na významné zastoupení vibrací ve vyšších

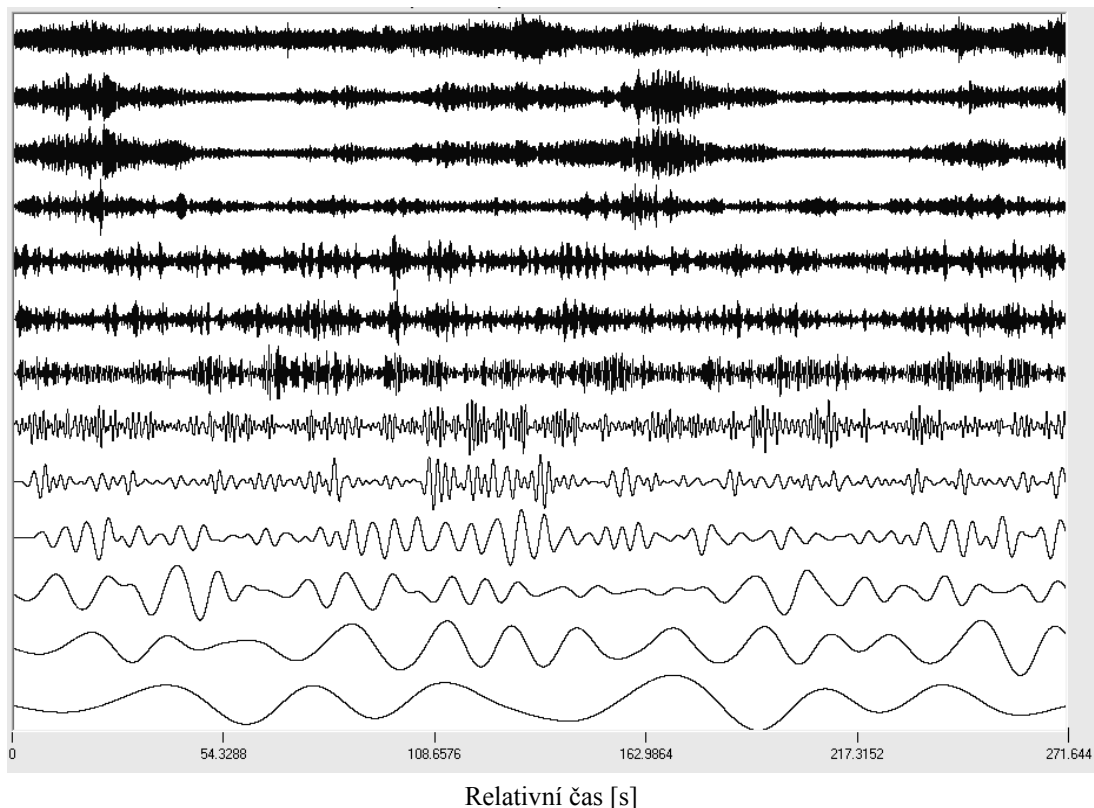
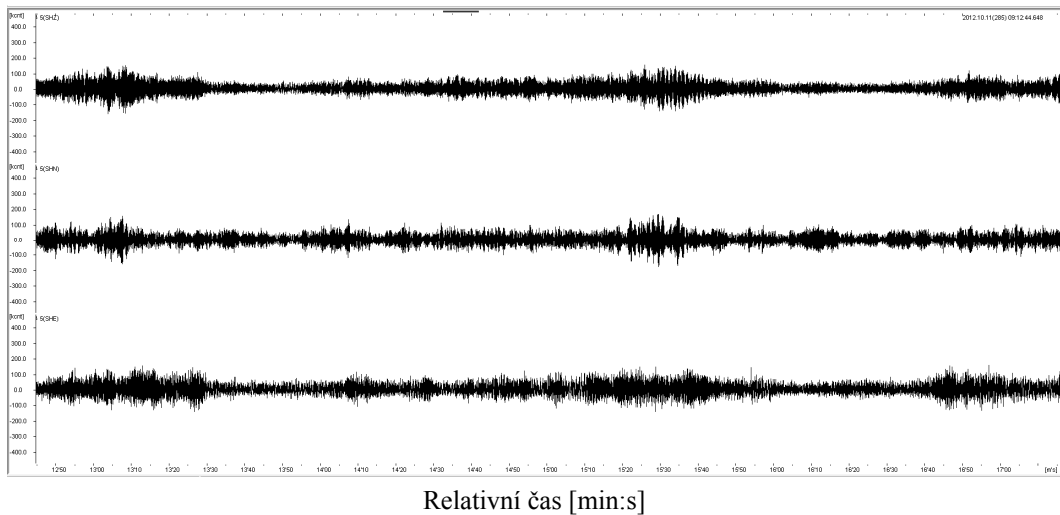
frekvenčních hladinách, což je nutno vzít v úvahu při hodnocení zvýšení seizmického zatížení pro přístroje citlivé na vibrace nacházející se v blízkém okolí prováděných prací.



Obr. 2 Záznam vibrací vyvolaných vibračním válcem při hutnění štěrkového podkladu (nahore) a paketový rozklad (dole); na vodorovné ose je čas v s, na svislých osách amplitudy (detaily a popis v textu)



Obr. 3 Záznam vibrací vyvolaných demoličním kladivem tunelu Jablunkov (nahore) a paketový rozklad (dole); na vodorovné ose je čas v s, na svislých osách amplitudy (detaily a popis v textu)



Obr. 4 Záznam vibrací vyvolaných v okolí stožáru větrné elektrárny v Loděnicích (nahore) a paketový rozklad (dole); na vodorovné ose je čas v s, na svislých osách amplitudy (detaily a popis v textu)

Záznam na obr. 4 (nahore) je vlnový obraz vibrací, který byl získán při umístění senzoru v malé vzdálenosti od stožáru větrné elektrárny při slabém ustáleném větru. Měření bylo realizováno ve větrném parku v Loděnicích. Časově-frekvenční analýza záznamu tohoto typu, která byla představena v článku Kalába [6], ukázala, že při rozkmitání stožáru se jedná o signál se širokým

rozsahem zastoupených frekvencí v rozsahu od cca 9 do 40 Hz a výše. Paketový rozklad zvoleného úseku ukazuje zastoupení signálu ve všech rozkladových hladinách. Současně lze pozorovat, že amplituda signálu je víceméně rovnoměrná, uvedené rezonanční kmitání je velmi slabé až nedetekovatelné, a to na rozdíl od projevů představených v předchozích dvou příkladech. Frekvenční analýza signálu představuje víceméně spektrum bílého šumu

#### 4 ZÁVĚR

Technická a indukovaná seizmicita se dostává do stále větší pozornosti. To dokládá i aktivita IASPEI, která založila pracovní skupinu Triggered and Induced Seismicity (<http://tais.iaspei.net/>, [21]). Jejím cílem je shrnutí stávajících poznatků z dané vědní oblasti, studium možností současné monitorovací techniky a interpretaci dat pro posouzení a snížení seizmického rizika.

Interpretace záznamů technické seizmicity se provádí jak v časové, tak i časově-frekvenční oblasti. Naše studie v této problematice jsou publikovány např. v [9, 11, 14, 17, 19]. Práce se soustředily nejen na stanovení projevů, ale také na posouzení vlivu geologického prostředí.

Cílem tohoto příspěvku bylo ukázat možnost využití paketového rozkladu na bázi waveletové transformace. Paketový rozklad umožňuje dále analyzovat i detailní složky a zpřesňovat tak frekvenční i časovou lokalizaci vyvolaných vibrací. Ve svém důsledku je možné rozkládat libovolnou složku (aproximaci, detail) na libovolné hladině. Na rozdíl od filtrací digitálních signálů pásmovou propustí, paketový rozklad waveletovou transformací je bezztrátový a nedochází tedy při interpretaci ke ztrátě informace. Dva příklady, a to vibrace vyvolané při hutnění štěrkového lože a vibrace vyvolané bouracím kladivem, mají paketové rozklady signálů, které ukazují nerovnoměrné rozložení vibrací v jednotlivých frekvenčních intervalech. Z rozkladů je zřejmé, že jde o signály se širším rozsahem frekvencí, a to v rozmezí od 250 Hz do 15 Hz. Jiný typ paketového rozkladu byl získán z měření vibrací vyvolaných větrnou elektrárnou (slabý signál srovnatelný se seizmickým neklidem), jenž poskytl víceméně rovnoměrnou amplitudu signálu na všech rozkladových intervalech.

Prostorové zobrazení rozkladu umožňuje využití časově-frekvenční analýzy nejen k názorné prezentaci časově-frekvenčního rozkladu signálu (prostorové zobrazení signálu), ale také např. k rychlému provedení typové analýzy signálů a odhadu převládajících frekvencí v různých časových intervalech (zvláště pro kontinuální signály z dlouhodobého monitoringu). Waveletové rozklady umožňují detailněji studovat stavbu seismogramů jak v časové, tak i frekvenční oblasti.

#### PODĚKOVÁNÍ

*Práce byly podporovány z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2013 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.*

#### LITERATURA

- [1] ČASTOVÁ N., KALÁB, Z. Waveletový rozklad seismologických signálů. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO*, 2003, č. 2., roč. III, řada stavební, pp. 51-60. ISSN 1213-1962, ISBN 80-248-0499-9.
- [2] FOUFOULA-GEORGIOU, E., KUMAR, P. Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics*. 2010, Vol. 35, Issue 4, pp. 385–412. DOI: 10.1029/97RG00427
- [3] GROSSMAN, A., MORELET, J. Decomposition of Hardy Function into Square Interable Wavelets of Constant Shape. *SIAM, J. Math. Anal.* 1984, Vol. 15, pp. 723-736.
- [4] HORÁK, D. *Diskrétní transformace*. 2012. <[http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/diskretni\\_transformace.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/diskretni_transformace.pdf)> [cit. 2013-03-11]
- [5] KALÁB, Z. *Seizmická měření v geotechnice*. VŠB-TUO, fakulta stavební, Ostrava, 2008. 125 pp. ISBN 978-80-248-1796-5.
- [6] KALÁB, Z. Úvodní studie hodnocení vibrací vyvolaných větrnou turbínou. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO*, 2012, č. 2., roč. XII, řada stavební, pp. 93-102. ISSN 1213-1962.

- [7] KALÁB, Z., ČASTOVÁ N. Desetiletí použití waveletové transformace pro důlně indukované seizmické jevy na ÚGN. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO*, 2007, č. 2., roč. VII, řada stavební, pp. 43-50. ISSN 1213-1962, ISBN 978 -80-248-1616-6, 43-50.
- [8] KALÁB, Z., LEDNICKÁ. M., LYUBUSHIN, A.A. Processing of Mining Induced Seismic Events by Spectra Analyzer Software. *Górnictwo i geologia. Kwartalnik*. 2011, tom 6, zeszyt 1, pp. 75-83. PL ISSN 1896-3145.
- [9] KALÁB, Z., LEDNICKÁ. M., KORÍNEK, R., HRUBEŠOVÁ, E. Influence of Local Geological Pattern on Values of Vibrations Induced by Road Traffic. *Acta Geophys*. 2012, Vol. 60, No. 2., pp. 426-437. ISSN 1895-6572 (print version)
- [10] KLEES, R., HAAGMANS, R. (eds). *Wavelets in the Geosciences*. Springer, Berlin and others, 2000. 241 pp. ISBN 3-540-66951-5.
- [11] LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z. Hodnocení vibrací během výstavby štětovnicové stěny v zastavěné oblasti. *Geotechnika*. 2011, roč. 14, č. 3/2011, pp. 16-21. ISSN 1211-913X
- [12] LYUBUSHIN, A.A. *Geophysical and Ecological Monitoring Systems Data Analysis*. Nauka, Moscow, 2007. 228 pp. (in Russian). ISBN 5-02-034063-4.
- [13] LYUBUSHIN JR., A.A., KALÁB, Z. AND ČASTOVÁ, N. Application of Wavelet Analysis to the Automatic Classification of Three-Component Seismic Records. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2004, Vol.40, No.7, pp. 587-593. ISSN 1069-3513.
- [14] PETŘÍK, T., LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z., HRUBEŠOVÁ, E. Analysis of Technical Seismicity in the Vicinity of Reconstructed Road. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*, No. 1, 2012, Vol. XII, paper #5, 10 pp. ISSN 1804-4824 (On Line)
- [15] PINKA, M. Příspěvek k interpretaci vibrací v okolí hutněného prostoru. *Sborník referátů konference „GEOTECHNIKA 2012“*. 2012, s. 184-189, Stupava.
- [16] PINKA, M., STOLÁRIK. M. Seismic response hydraulic hammer on the Secondary lining tunnel. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava. Construction Series*. 2012, XII, No. 2, p. 132-142. ISSN 1804-4824. DOI: 10.2478/v10160-012-0027-1. Dostupné z: <http://versita.com>
- [17] PINKA, M., STOLÁRIK. M., FOJTÍK, R., a PETŘÍK, T. Experimental Seismic Measurement on the Testing Construction and The Analyze. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava. Civil Engineering Series*. 2012, XII, No. 1, p. 1-11. ISSN 1804-4824. DOI: 10.2478/v10160-012-0006-6. Dostupné z: <http://versita.com>
- [18] PIRNER, M. *Životní prostředí a technická seizmicita*. 2009. <<http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=2118>> [cit. 2013-03-11]
- [19] SALAJKA, V., KALÁB, Z., KALA, J., HRADIL, P. Response of the Residential Building Structure on Load Technical Seismicity due to Mining Activities. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009, Vol. 50, www.waset.org, pp 214-222. ISSN 2070-3724.
- [20] SOLAŘ, J. *Zajištění zděných staveb proti vlivům technické seizmicity*. 2007. <<http://www.imaterialy.cz/Zdene-konstrukce/Zajisteni-zdenych-staveb-proti-vlivum-technicke-seizmicity.html>> [cit. 2013-03-11]
- [21] <<http://tais.iaspei.net>> [cit. 2013-03-11]

#### **Oponentní posudek vypracoval:**

Prof. Ing. Igor Leško, CSc., Ústav riadenia a informatizácie výrobných procesov, Fakulta BERG, TU v Košiciach.

Ing. Urushadze Shota, PhD, Centrum experimentální mechaniky, Ústav teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v. v. i.