

Zdeněk KALÁB¹

ÚVODNÍ STUDIE HODNOCENÍ VIBRACÍ VYVOLANÝCH VĚTRNOU TURBÍNOU

AN INITIAL STUDY EVALUATING VIBRATION EFFECTS OF WIND TURBINE

Abstrakt

Jedním z negativních vlivů větrných elektráren na okolní prostředí jsou vibrace. V článku je představen výsledek analýzy experimentálního seizmologického měření ve větrném parku Horní Loděnice – Lipina. Časově-frekvenční spektra záznamů naměřených v okolí jedné z elektráren ukazují při ustáleném větru na generování harmonických kmitů do okolí. V článku jsou uvedeny výsledky této analýzy.

Klíčová slova

Větrná elektrárna, seizmické vibrace, časově-frekvenční spektrum.

Abstract

Seismic vibrations represent one of the negative influences of wind turbines on their surroundings. Results of analysis of experimental seismological measurement performed in Horní Loděnice – Lipina wind farm are presented in this paper. Time-frequency spectra calculated from measured wave patterns realized around one wind turbine documented generation of harmonic waves into massif. Results of this analysis are presented in this contribution.

Keywords

Wind turbine, seismic vibration, time-frequency spectrum.

1 ÚVOD

Energie z větrných elektráren patří k populárním obnovitelným zdrojům energie. V České republice je v současnosti evidováno více než 150 větrných elektráren a několik desítek malých větrných elektráren využívaných pro vlastní potřebu majitelů, <http://csve.cz/> (jaro 2012). V roce 2011 vyrobily tyto elektrárny téměř 400 GWh. Větrné turbíny používané v ČR jsou několika typů, stojí samostatně, v malých skupinách nebo tvoří tzv. větrné parky (farmy). Situaci větrných elektráren v ČR lze najít např. v [5, 7, 11].

Positiva z provozu větrných elektráren lze shrnout do následujících bodů (např. [17]) energetická nezávislost větrných elektráren, nenákladnost na palivo, podpora šetření energetických neobnovitelných zdrojů, žádná produkce emisí, žádná produkce odpadů a záření, produkce bez dovozu a těžby energetických zdrojů.

Častěji než positiva se však diskutují negativní vlivy. Odpůrci tohoto způsobu výroby elektrické energie poukazují na vizuální a akustické rušení ptáků a netopýrů, kolize létajících živočichů s rotujícími vrtulemi, zásah do biotopů živočichů a rostlin, hluk (infrazvuk

¹ 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) 597 321 948, e-mail: zdenek.kalab@vsb.cz.

i nízkofrekvenční hluk), vibrace, stroboskopický efekt a odhazování ledu z lopatek turbíny. Zřejmě nejdiskutovanějším problémem je změna krajinného rázu.

Jedním z následků budování těchto objektů jsou též vibrace, které se šíří do okolního prostředí např. [1, 4, 12]. Známé vibrační studie se zpravidla věnují pouze rotoru vrtule a stožárové konstrukci, např. [2, 8]. Sporadicky jsou uváděny informace o nízkofrekvenčních vibracích v okolí větrných elektráren. Avšak vibrace, zvláště pod 20 Hz, jsou velmi účinně přenášeny horninou, zemínou a též základovými konstrukcemi budov. V současné době nejsou známy podrobnější informace o experimentálních měřeních a interpretacích, které by podrobněji zhodnotily pole vibrací v okolí větrné elektrárny, příp. větrné farmy. V tomto článku jsou představeny výsledky experimentálního měření, které bylo realizováno ve větrném parku Horní Loděnice - Lipina.

2 POPIS LOKALITY

Větrný park Horní Loděnice – Lipina v Olomouckém kraji (obr. 1) má celkem devět větrných elektráren typu Vestas V90 – 2 MW. Jeho provozovatelem je firma Větrná energie HL s.r.o. Park se v evropském měřítku řadí mezi menší větrné parky, přesto se ale jedná o největší zrealizovaný projekt na Moravě a druhý největší projekt v České republice. Jako první při výstavbě začaly práce na komunikacích, základech a kabelové trase a trafostanici v roce 2008. Samotná montáž elektráren započala v roce 2009 a spočívala v montáži ocelových stožárů a následném usazení turbín (strojoven). Těchto devět větrných elektráren je schopno ročně vyrobit 43 000 000 kWh, při čemž ušetřené roční emise činí 43 000 tun CO₂, 80 tun SO₂ a 70 tun NO_x. Roční ušetřené emise polétavého prachu jsou 3 tuny (podle místní informační cedule).



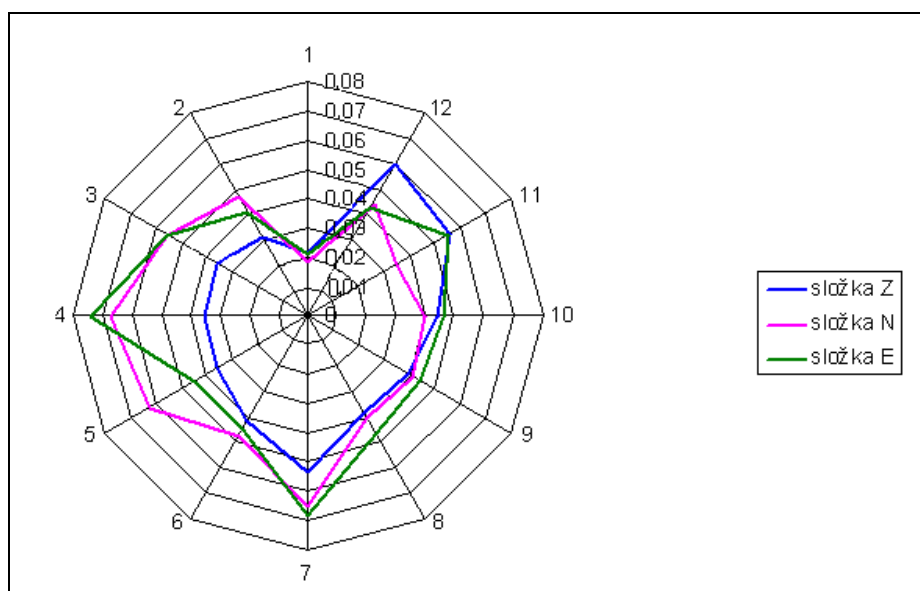
Obr. 1: Satelitní mapa větrného parku u Horní Loděnice (výšek mapy z maps.google.cz)

Lokální geologická stavba lokality je reprezentována jílovitými břidlicemi, prachovci a drobnými moravsko-slezského paleozoika. Jedná se o zpevněné sedimenty, zpravidla drobnozrnné nebo středně zrnité. Tyto sedimenty mají rychlost šíření podélných seizmických vln v rozmezí 1,5 až 4,5 km.s⁻¹. Lokálně lze nalézt křemité břidlice se silicity, vápnité pískovce až písčité vápence, křemité pískovce, slepence a brekcie (geologická stavba podle Internetu: Geologické a geovědní mapy [6]). Na povrchu je málo mocná vrstva jílovitých hlín.

3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Experimentální měření vibračních projevů bylo realizováno v roce 2011 - primární data byla použita v bakalářské práci Stašové [18]. Měření bylo realizováno komerčními stanicemi typu GAIA se senzory ViGeo2; vzorkovací frekvence digitálních dat byla 250 Hz, frekvenční rozsah seizmického kanálu 2 – 80 Hz, čas aparatur byl synchronizován dle časového normálu GPS. Měření s kontinuálním záznamem dat proběhlo na několika profilech, při všech bylo zvoleno paprskové uspořádání senzorů - vodorovná radiální složka N senzorů byla směřována k patě větrné elektrárny. Doba měření na jednotlivých bodech byla nejméně 10 minut, aby byl získán dostatečně dlouhý záznam nejen pro odečet maximální rychlosti kmitání, ale také pro detailní časově-frekvenční analýzu (představena v tomto příspěvku).

V bezprostřední blízkosti zvolené větrné elektrárny (49°45'12.582"N 17°21'22.324"E) byla provedena měření na dvou polopřímkových profilech s rozstupem jednotlivých bodů měření 2 m. První bod byl situován ve vzdálenosti 1 m, poslední ve vzdálenosti 25 m od paty stožáru. Senzory byly usazeny přímo na zemině, v místě plochy před stožárem elektrárny na ztuhnutý štěrk. Jeden profil byl veden kolmo na rovinu listů vrtule větrné turbíny, druhý profil byl veden v rovině listů vrtule. Primární interpretace v časové oblasti potvrdila rychlý útlum vibrací v závislosti na vzdálenosti od paty stožáru. Maximální naměřené hodnoty rychlosti kmitání dosáhly téměř $0,07 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ v nejmenší měřené vzdálenosti 1 m od paty stožáru; ve 12 m byly vyvolané vibrace pod hodnotou $0,01 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Hodnoty na jednotlivých složkách byly srovnatelné. Lokální seizmický neklid se pohyboval řádově v prvních tisícinách $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Je nutno uvést, že vítr byl po dobu měření víceméně konstantní se slabými závany, taktéž rovnoměrná byla i rychlost otáčení listů vrtule (cca 12 otáček za minutu, frekvence 0,2 Hz). Další profil tohoto měření byl realizován jako kruhový ve vzdálenosti 3 m od paty stožáru (obr. 2, převzato z [18]). Maximální hodnoty rychlosti kmitání se nacházely v rozsahu $0,03$ až $0,07 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Rovina listů vrtule je v rovině označené čísly 1-7 (viz obr. 2). Z výsledků tohoto měření nebylo možno prokázat zvýšené seizmické účinky v některém ze směrů, například v rovině listů vrtule či rovině kolmé. Nižší naměřené hodnoty v bodě 1 jsou pravděpodobně důsledkem podmačení místa se senzorem. Dále byla realizována i bodová měření na vybraných bodech, např. na schodech vedoucích do stožáru.



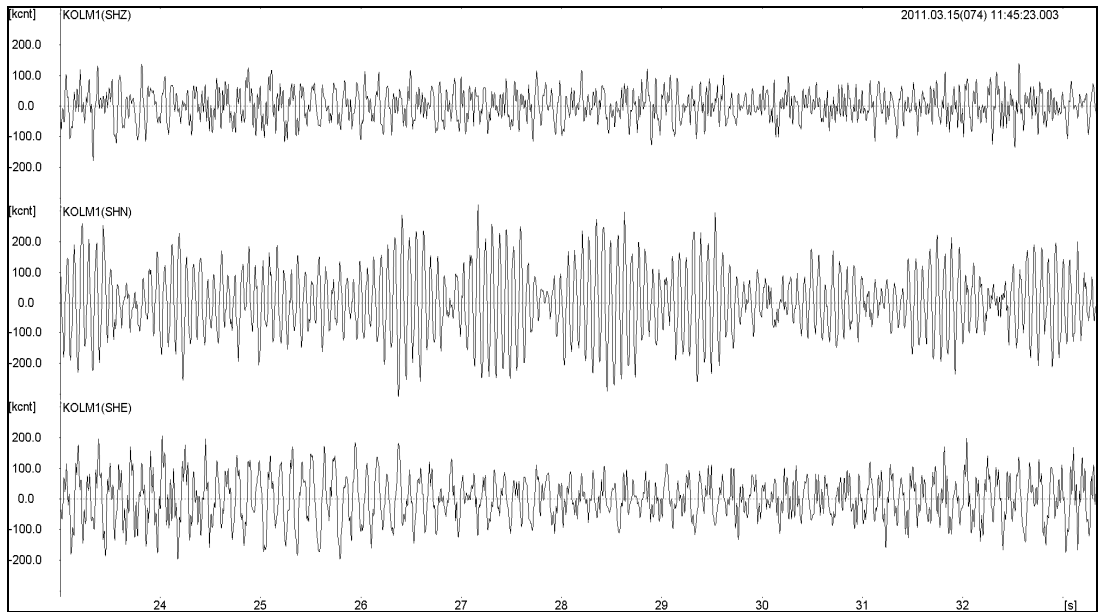
Obr. 2: Maximální hodnoty rychlosti kmitání [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$] v jednotlivých bodech kruhového profilu ve vzdálenosti 3 m od paty stožáru větrné elektrárny pro jednotlivé složky – geografická orientace senzorů, označeno Z, N, E (převzato z [18])

4 ČASOVĚ-FREKVENČNÍ ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

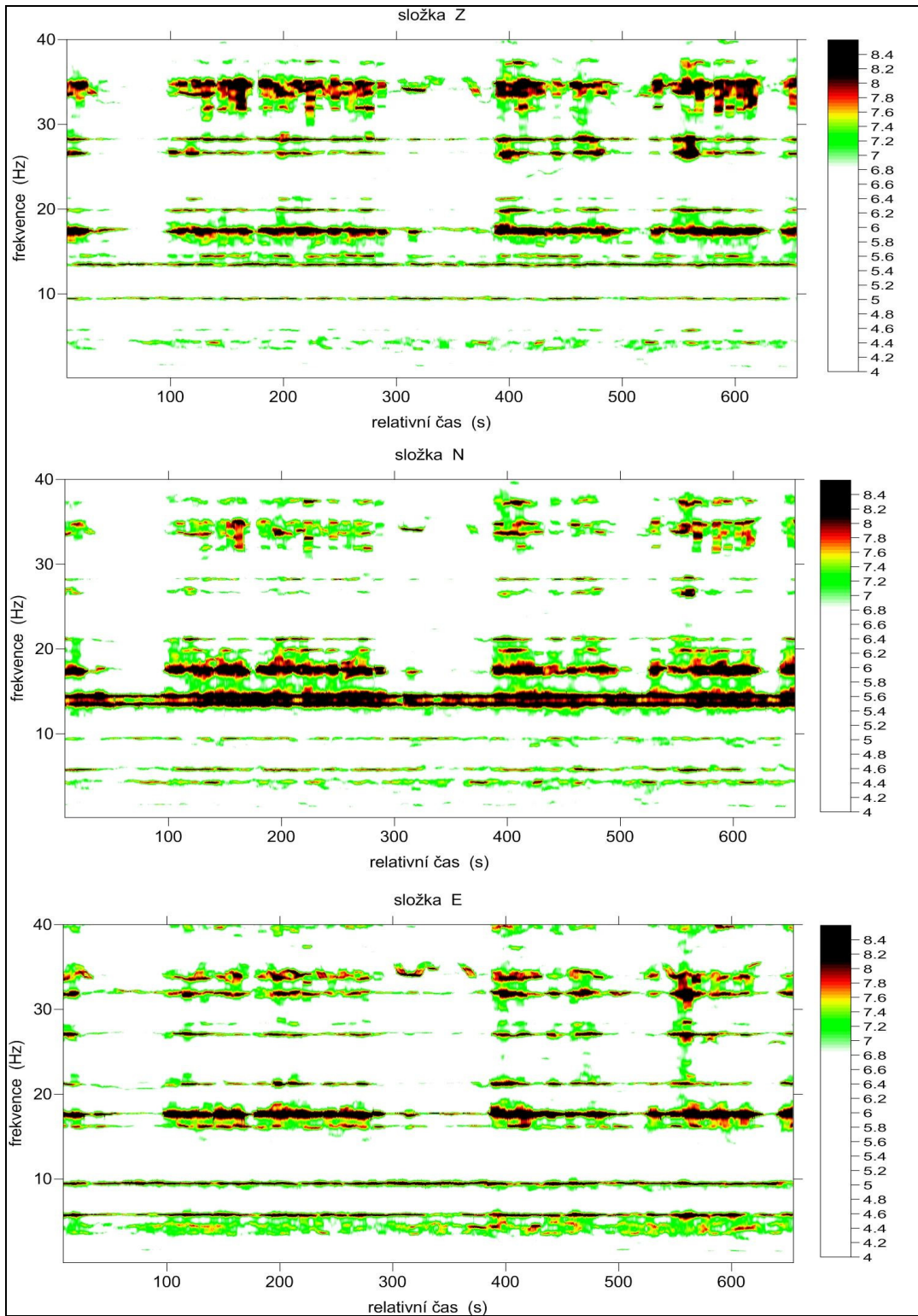
K interpretaci dat v časově-frekvenční oblasti byl použit specializovaný software SpectraAnalyzer vyvinutý na zpracování časových řad [14, 9]. Metodika zpracování dat vychází z Fourierovy a waveletové analýzy. Parametry programu a signálu (vzorkovací frekvence zpracovávaného signálu, počet a rozsah frekvenčních 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. Nyquistův-Shannonův vzorkovací teorém.

V následujícím textu je pro prezentaci použito časově-frekvenčního rozkladu signálu; na vodorovné ose je vyneseno čas v sekundách, na svislé ose frekvence signálu v jednotkách Hz a barevná škála představuje hustotu frekvence (tato škála není jednotná pro všechny obrázky).

Záznam na obr. 3 je vlnový obraz vibrací, který byl získán při umístění senzoru na kovovém schodišti vedoucím do stožáru elektrárny (plošina u stožáru cca 2 m nad zemí). Časově-frekvenční rozklad části zaznamenaného signálu je na obr. 4. Protože nebyla provedena speciální měření, ale pouze měření běžnou metodikou s cílem získat informace pro stanovení maximálních hodnot rychlosti kmitání, není možno provést přesné stanovení zdrojů jednotlivých dominantních frekvencí. První dominantní frekvenci v rozkladech je hodnota cca 9 Hz a násobky této hodnoty. Nejvýznamněji je projev detekovatelný na složkách vertikální a horizontální transversální. Na složce horizontální radiální dominuje frekvence cca 14 - 15 Hz. K výraznějším kmitům lze přiřadit i hodnotu cca 35 Hz. Tyto převládající hodnoty frekvencí mohou představovat projev kmitání stožáru s betonovým základem, pravděpodobně jde také o vibraci vyvolanou rezonancí kovového schodiště.

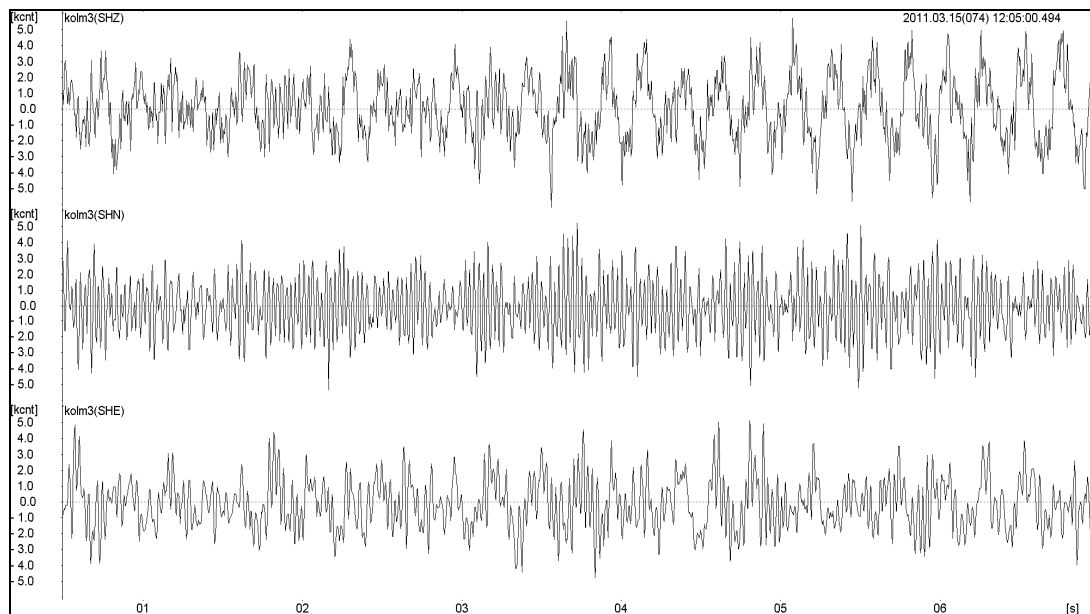


Obr. 3: Část záznamu vibrací naměřeného na schodišti vedoucím do stožáru elektrárny; vodorovná osa – časové značky, svislé osy – amplituda rychlosti kmitání ve vzorkovacích jednotkách ($1 \text{ kcnt} = 2,975 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, tj. rozsah $200 \text{ kcnt} = 0,595 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), shora dolů složky: svislá Z, horizontální radiální N a horizontální transversální E (ze software SWIP)



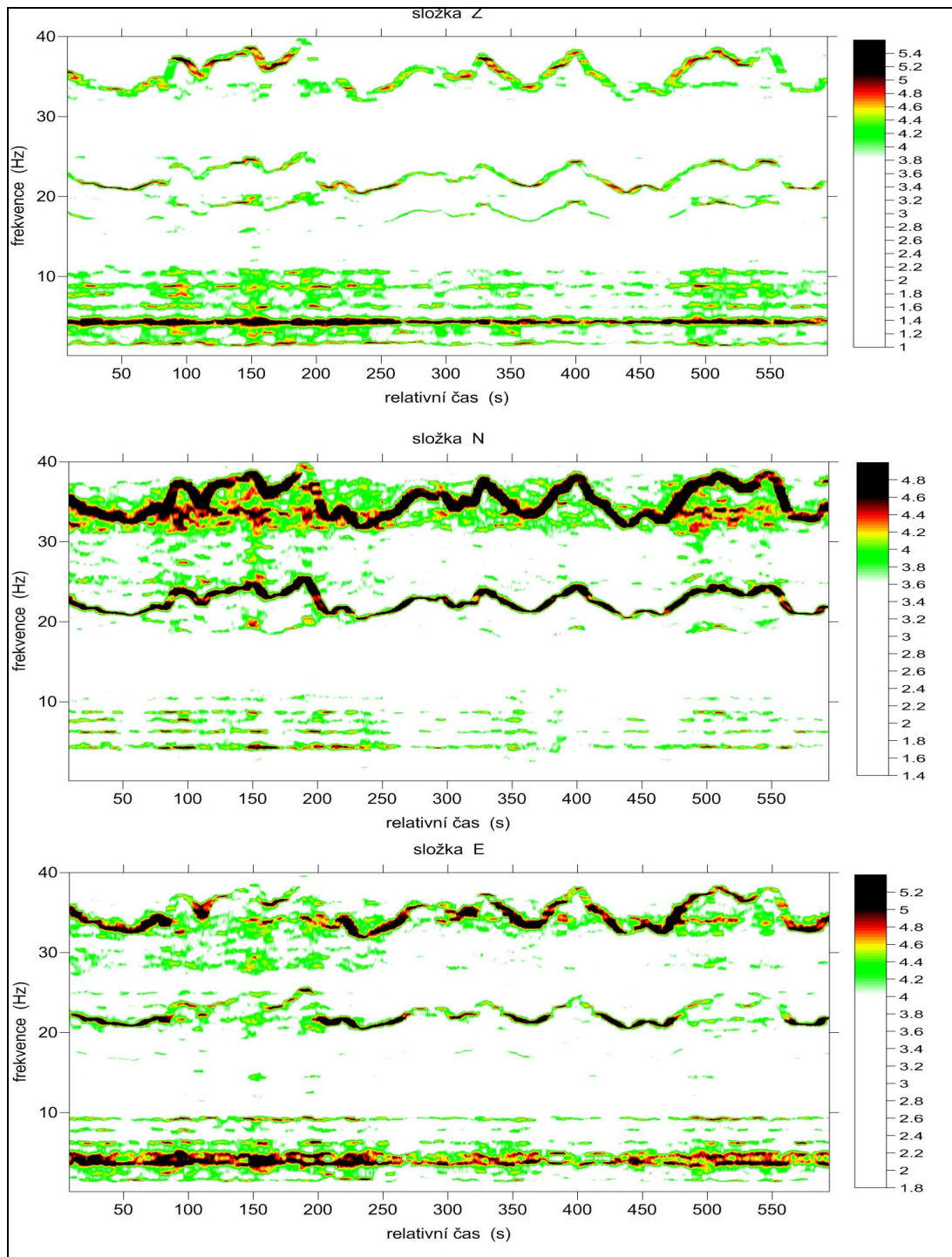
Obr. 4: Časově-frekvenční spektrum části záznamu vibrací naměřeného na schodišti vedoucím do stožáru elektrárny; vysvětlivky viz text

Druhý analyzovaný záznam pochází ze stanoviště vzdáleného 3 m od paty stožáru, senzor byl uložen na hlínu, z níž byl odstraněn travnatý porost. Lze předpokládat, že jde o nepříliš mocnou vrstvu zeminy navezené na betonový armovaný základ větrné elektrárny (zpravidla plocha 15x15 m). Záznam vibrací je na obr. 5, časově-frekvenční spektrum je na obr. 6. Také na tomto stanovišti dominuje na vertikální a horizontální transversální složce nižší převládající frekvence (cca 5 Hz) než na složce horizontální radiální (cca 22 Hz a 32 Hz). Tyto vyšší hodnoty, které jsou detekovatelné v časově-frekvenčních spektrech všech tří složek, nemají zcela stabilní hodnotu. Pozvolná změna probíhá v rozmezí cca 5 Hz, tvar vzniklých křivek je identický.

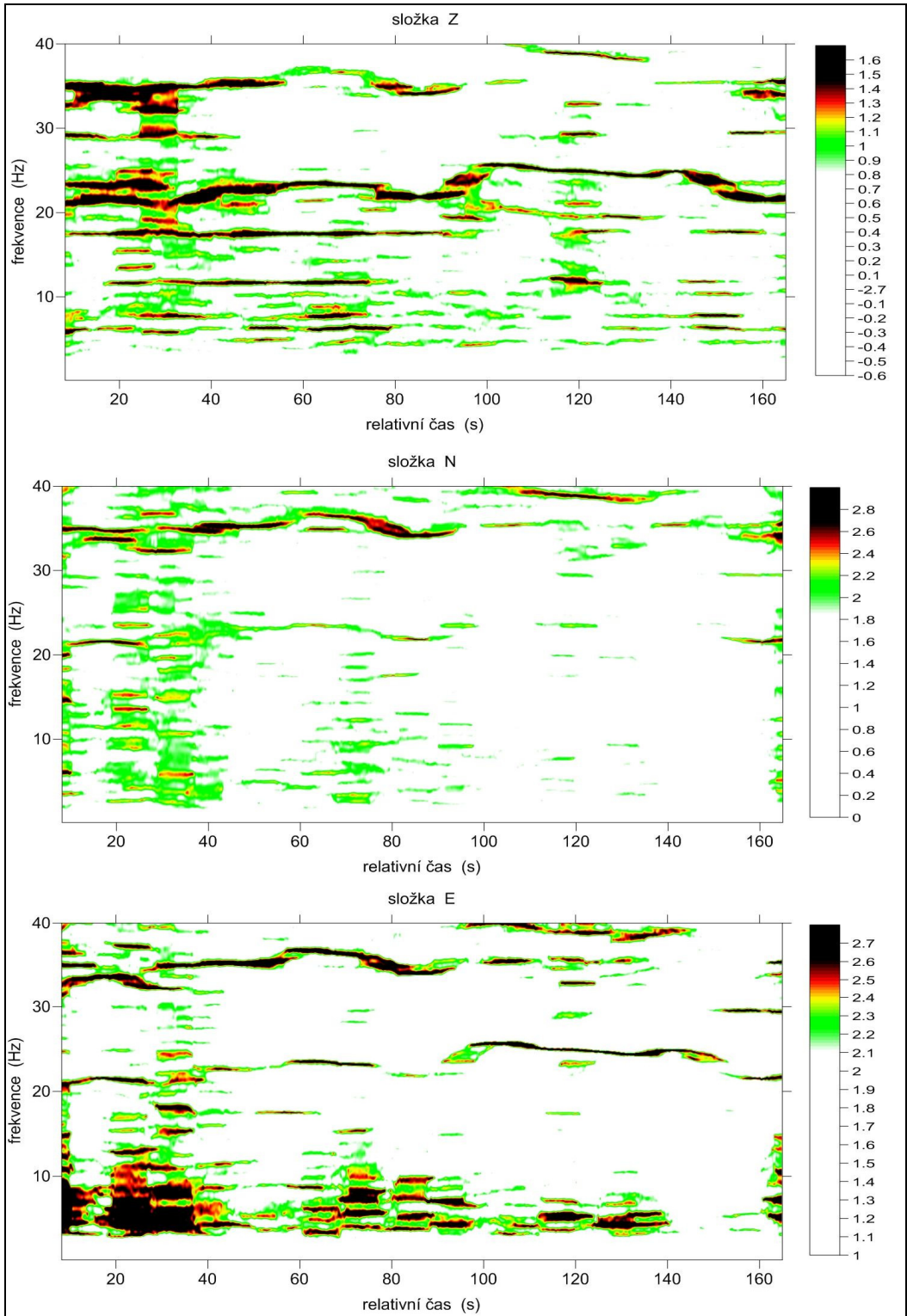


Obr. 5: Část záznamu vibrací naměřeného 3 m od paty stožáru; vodorovná osa – časové značky, svislé osy – amplituda rychlosti kmitání ve vzorkovacích jednotkách (1 kent = $2,975 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, tj. rozsah 5 kent = $0,015 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), shora dolů složky: svislá Z, horizontální radiální N a horizontální transversální E (ze software SWIP)

Poslední časově-frekvenční spektrum (obr. 7) pochází ze stanoviště, které se nacházelo ve vzdálenosti 100 m od větrné elektrárny. Hodnoty rychlostí kmitání jsou na nízké úrovni, v této vzdálenosti již projevy rezonance stožáru elektrárny, příp. jiných prvků elektrárny jsou těžce identifikovatelné nebo nejsou detekovatelné vůbec. Slabý projev harmonických kmitů lze sledovat na 22 Hz a 32 Hz, vlny opět nemají stabilní hodnotu.



Obr. 6: Časově-frekvenční spektrum části záznamu vibrací naměřeno na schodišti vedoucím do st3ožáru elektrárny; vysvětlivky viz text



Obr. 7: Časově-frekvenční spektrum části záznamu neklidu ve větší vzdálenosti od elektrárny; vysvětlivky viz text

5 ZÁVĚR

Cílem tohoto příspěvku bylo představit výsledky měření seizmického zatížení vyvolaného provozem větrné elektrárny v jejím okolí. Tato seizmicita spadá do kategorie technických vibrací, které jsou zvláště v poslední době původcem zneklidnění obyvatelstva a někdy též zdrojem poškození stavebních objektů, např. [16, 10, 13, 15 a další]. Interpretace naměřených dat byla provedena jak v časové, tak i časově-frekvenční oblasti. Nejsou měřeny a hodnoceny vlastní vibrace stožáru a jednotlivých konstrukčních prvků větrné turbíny, což je problematika spadající do oblasti vibrací konstrukcí (např. [3]).

Experimentální seizmologické měření proběhlo na lokalitě Horní Loděnice – Lipina v Olomouckém kraji. V okolí jednoho ze stožárů v tomto větrném parku byly pořízeny záznamy projevů vibrací na třech různě orientovaných profilech při víceméně konstantním větru se slabými závany. Tyto závany se zřejmě projevují v záznamech jako významnější zvyšování seizmického neklidu a též některých harmonických složek v signálu. Maximální naměřené hodnoty rychlosti kmitání dosáhly téměř $0,07 \text{ mm.s}^{-1}$ v nejmenší měřené vzdálenosti 1 m od paty stožáru; ve 12 m byly vyvolané vibrace pod hodnotou $0,01 \text{ mm.s}^{-1}$. Rychlost otáčení vrtule byla 0,2 Hz. Podrobnější vyhodnocení záznamů v časové oblasti zde není prezentováno, neboť bylo náplní citované bakalářské práce [18].

Časově-frekvenční analýza naměřených seizmologických dat (ve frekvenčním rozsahu seizmického kanálu 2-80 Hz) ukázala existenci dominantních harmonických frekvencí, a to zvláště v malých vzdálenostech od paty stožáru, případně při umístění senzoru na kovovém schodišti vedoucím do stožáru. Výsledky této analýzy jsou dokladovány příklady záznamů vlnových obrazů vyvolaných vibrací a také časově-frekvenčními spektry (výstup z programu SpectraAnalyzer). V nejbližším okolí stožáru převládají vibrace s harmonickou frekvencí cca 5 Hz, dále pak jsou významné vibrace s frekvencemi cca 22 Hz a 32 Hz. Při měření na schodech vedoucích do stožáru převládala frekvence 9 Hz, což zřejmě souvisí s vibrací stožáru či schodů. Ve vzdálenosti 100 m od větrné elektrárny jsou naměřené hodnoty rychlostí kmitání na nízké úrovni – na úrovni běžného seizmického neklidu. Lokální geologická stavba byla v místě měření víceméně stejná a nezpůsobila detekovatelnou změnu naměřených dat.

Článek shrnuje poznatky pouze z jednoho měření. Po získání většího souboru dat v různých lokalitách bude možno realizovat podrobnější studie vlnového pole v okolí větrné elektrárny v závislosti na změně parametrů zeminového či horninového prostředí. Je plánováno také experimentální měření rotačních pohybů [19, 20]. Tato měření také poskytnou vstupní data pro numerické modelování daného problému.

PODĚKOVÁNÍ

Práce byly podporovány z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2012 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

LITERATURA

- [1] URL: <<http://www.bettergeneration.com/wind-turbines/wind-turbines-noise-and-vibration.html>> [cit. 2012-08-27]
- [2] URL: <<http://www.humusoft.cz/archiv/clanky/comsol/2011-mm-prum-spektrum-11/>> [cit. 2012-08-27]
- [3] URL: <http://www.pruftechnik.com/fileadmin/user_upload/COM/Machinery_Service/PDFs/Article_Overall_vibration_values_for_reliable_wind_turbines.pdf> [cit. 2012-08-27]
- [4] URL: <http://reliabilityweb.com/index.php/articles/vibration_analysis_of_wind_turbines> [cit. 2012-08-27]
- [5] URL: <<http://www.vetrne-elektrarny.com>> [cit. 2012-08-27]
- [6] URL: <<http://www.geologicke-mapy.cz/regiony/>> [cit. 2012-08-27]

- [7] CETKOVSKÝ, S., FRANTÁL, B., ŠTEKL, J. *Větrná energie v České republice*. 1. vyd. Brno : Ústav geoniky Akademie věd ČR, v.v.i., 2010. 208 pp. ISBN 978-80-86407-84-5.
- [8] HANSEN, M.H. Improved Modal Dynamics of Wind Turbines to Avoid Stall-induced Vibrations. *Wind Energ.* 2003, No.6, pp. 179–195. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.79/pdf>
- [9] 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.
- [10] KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., KOŘÍNEK, 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)
- [11] KAMINSKÝ, J. Důsledky provozu větrných elektráren. *Efektivní energetika*. 2010, VIII, 1, pp. 26-30.
- [12] KUSIAK, A., ZHANG, Z. *Analysis of Wind Turbine Vibrations Based on SCADA Data. Transactions of the ASME*. http://css.engineering.uiowa.edu/~ankusiak/Journal-papers/ASME_Solar_paper_2.pdf
- [13] 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
- [14] LYUBUSHIN, A.A. *Geophysical and Ecological Monitoring Systems Data Analysis*. Nauka, Moscow, 2007. 228 pp. (in Russian). ISBN 5-02-034063-4.
- [15] PANDULA, B., KONDELA, J., MIHALÍK, R., KAMENSKÁ, K. Použitie zákona útlmu seizmických vln v technickej seizmicite. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO*, 2010, č. 2., roč. X, řada stavební, pp. 91-102. ISSN 1213-1962.
- [16] 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)
- [17] SOCHÁŇ, P. *Vplyvy veterných elektrární na životné prostredie : Hluk, stroboskopický vplyv, námrazy, vplyvy na prírodné prostredie, krajinu, vtáctvo, netopiere, cicavce a ďalšie*. In *Veterná energia SR*, Bratislava, 2008. 17pp.
- [18] STAŠOVÁ, V. *Vliv vibrací větrných elektráren na okolní krajinu*. Ostrava, 2011, 41 pp. Bakalářská práce na VŠB – Technická univerzita Ostrava, HGF. Vedoucí práce Zdeněk Kaláb.
- [19] KNEJZLÍK, J., KALÁB, Z., RAMBOUSKÝ, Z.: Concept of Pendulous S-5-S Seismometer Adaptation for Measurement of Rotational Ground Motion. *Journal of Seismology*. 2012, DOI 10.1007/s10950-012-9279-6.
- [20] KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J.: Examples of rotational component records of mining induced seismic events from Karviná region. *Acta Geodyn. Geomater.*, 2012, Vol. 9, No. 2(166), pp. 173-178. ISSN 1214-9705.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Aleš Poláček, CSc., Institut geologického inženýrství, HGF, VŠB-TU Ostrava.

Mgr. Julian Kondela, PhD., Ústav geovied, fakulta BERG, TU v Košiciach.