

LOKALIZACE RÁZŮ V TECHNOLOGII S VYUŽITÍM VLNKOVÉ TRANSFORMACE

LOCALIZATION OF IMPACTS IN MACHINERY WITH THE USE OF WAVELET TRANSFORM

Zdeněk Kubín, Luboš Smolík a Václav Houdek

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 01 Plzeň

Abstrakt

Článek popisuje experimentální metodu, pomocí které lze lokalizovat rázy v obecné konstrukci. Měření vibrací v několika měřících bodech umožňuje stanovit čas, kdy rázová vlna dorazí od místa buzení ke snímači. Rychlosti rázových vln směřujících k jednotlivým snímačům se zdánlivě liší, protože obecná geometrie konstrukce ovlivňuje cestu rázové vlny mezi bodem rázu a měřícím bodem. Ráz tedy není možné přesně lokalizovat pouhou triangulací a úloha se řeší pomocí optimalizace. Přesnost optimalizace závisí na počátečních podmínkách a optimalizačních parametrech, proto je také studován a analyzován jejich vliv.

Abstract

This paper describes an experimental method that can be used to find the location of an impact point in a general three-dimensional structure. Measuring vibrations at several measurement points allows determining when the shock wave arrives from the excitation/impact point to the sensor. The velocities of the shock waves travelling to the sensors are seemingly different because the general geometry of the structure affects the path of the shock wave between the impact point and each sensor. For this reason, the impact point cannot be accurately localized by triangulation methods, and the problem is solved by constrained optimization. The accuracy of this method depends on initial conditions and optimization parameters, so their influence is also studied and analyzed.

Úvod

Tento článek byl motivován smluvním výzkumem, který probíhal v létě 2020 a spočíval v lokalizaci rázů v převodovce. Na základě tohoto výzkumu vyvinuli řešitelé oblasti výzkumu metodu, pomocí které lze lokalizovat vibrační anomálie, jako jsou například rázy, na základě měření vibrační odezvy zařízení nebo konstrukce s vysokou vzorkovací frekvencí (více než 100 kHz). Naměřená odezva je zpracována pomocí vlnkové transformace a je vyhodnocen čas, ve kterém dorazí vlna způsobená vibrační anomálií ke snímači vibrací. Protože není známá cesta, po které vlna ke snímači dorazila, není možné polohu anomálie určit pouhou triangulací a je nutné sestavit přeuročenou soustavu rovnic a lokalizovat anomálii pomocí optimalizace. Kvůli tomu nejsou výsledky zcela jednoznačné a je nutné lokalizaci provést několikrát s různými počátečními podmínkami a optimalizačními parametry.

Motivace

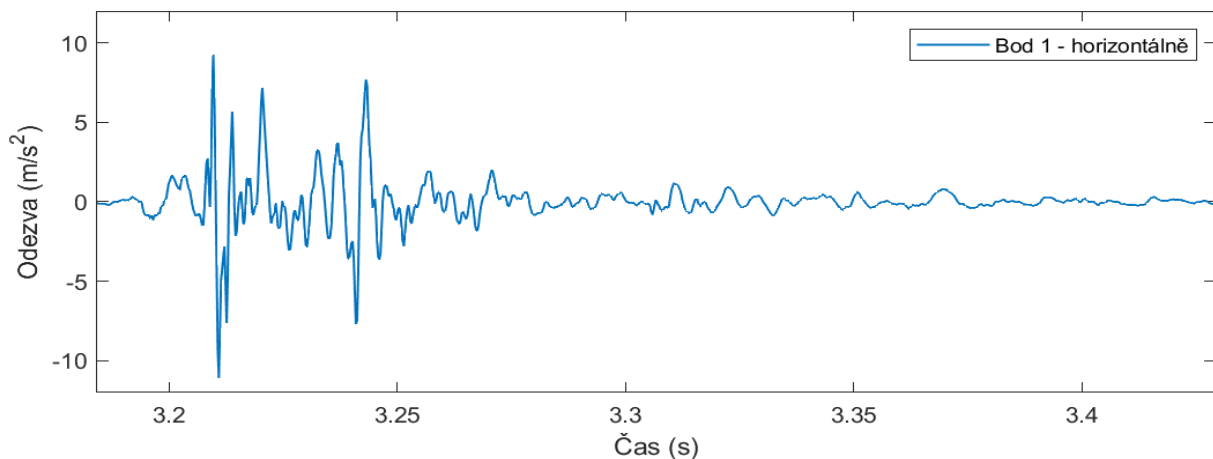
Rutinní diagnostické měření převodovky se dvěma vstupními a dvěma výstupními hřídeli (obr. 1) odhalilo, že v zařízení vznikají rázy s periodou jednou za otáčku výstupních hřídelů. Provozovatel převodovky předpokládal, že tyto rázy mohou vznikat v jednom z kardanových hřídelů připojených na výstupní hřídele. Z toho důvodu byla následná diagnostika provedena nejen pomocí přenosného analyzátoru vibrací a kontaktních snímačů zrychlení, ale také s využitím vysokorychlostní kamery. Záznam z vysokorychlostní kamery je možné použít pro analýzu výchylek na stacionárních i rotujících součástech zařízení [1].



Obr. 1: Pohled na převodovku se dvěma motory a dvěma výstupními hřídeli

Právě s využitím vysokorychlostní kamery se autoři v prvním kole pokusili rázy lokalizovat. Nicméně během měření bylo zjištěno, že rázy nevznikají v kloubech kardanových hřídelů ani ve válčovacím zařízení, které bylo převodovkou poháněné. Příčinu tedy bylo nutné hledat uvnitř převodovky. Vzhledem ke konstrukčnímu provedení převodovky, které zahrnuje několik zubových vazeb s totožným převodovým poměrem, nebylo možné určit poruchu standardními metodami technické diagnostiky. Standardní technická diagnostika identifikuje poruchu při znalosti tzv. poruchových frekvencí, které jsou u zmíněných zubových vazeb totožné.

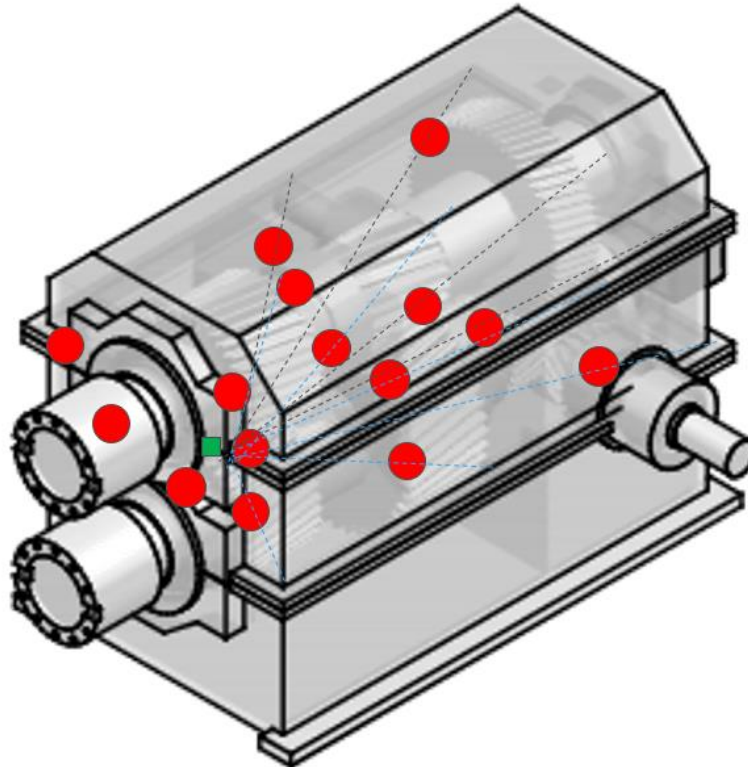
Proto bylo následně přistoupeno k měření vibrací na skříni převodovky s analyzátozem vibrací Brüel & Kjaer 3050-A060 a čtyřmi tříosými snímači zrychlení Brüel & Kjaer 4529 B (nom. citlivost 100 mV/g). Měření odezvy bylo provedeno s vysokou vzorkovací frekvencí (140 kHz), aby se podařilo přesně určit čas příchodu rázové vlny do jednotlivých měřicích bodů. Odezva byla měřena celkem v 17 různých měřicích bodech a 1 referenčním bodě. Typický záznam odezvy je ukázán na obr. 2. Ze záznamů odezvy se autoři pokusili lokalizovat rázové buzení pomocí standardní triangulační metody.



Obr. 2: Časový průběh signálu s rázovou vlnou; čas příchodu vlny je cca 3,2 s

Jelikož všech 18 měřicích bodů nebylo možné změřit během jedné realizace, musel být triangulační algoritmus upraven s využitím referenčního (nehybného) snímače. Kvůli nehomogenní geometrii nelze předpokládat, že se rázová vlna šíří do všech směrů stejnou rychlostí, a proto

tento prvotní algoritmus zahrnoval pouze poměr příchodu mezi referencí a odezvou. Výsledek takto použité triangulační metody nebyl zcela uspokojivý, jak ukazuje obr. 3. Tento ne příliš sofistikovaný přístup byl později rozšířen s využitím dvou moderních metod. Zaprvé, časový signál byl podroben vlnkové transformaci. Zadruhé, lokalizace rázu pomocí podílu bylo nahrazeno soustavou rovnic a optimalizačním výpočtem.

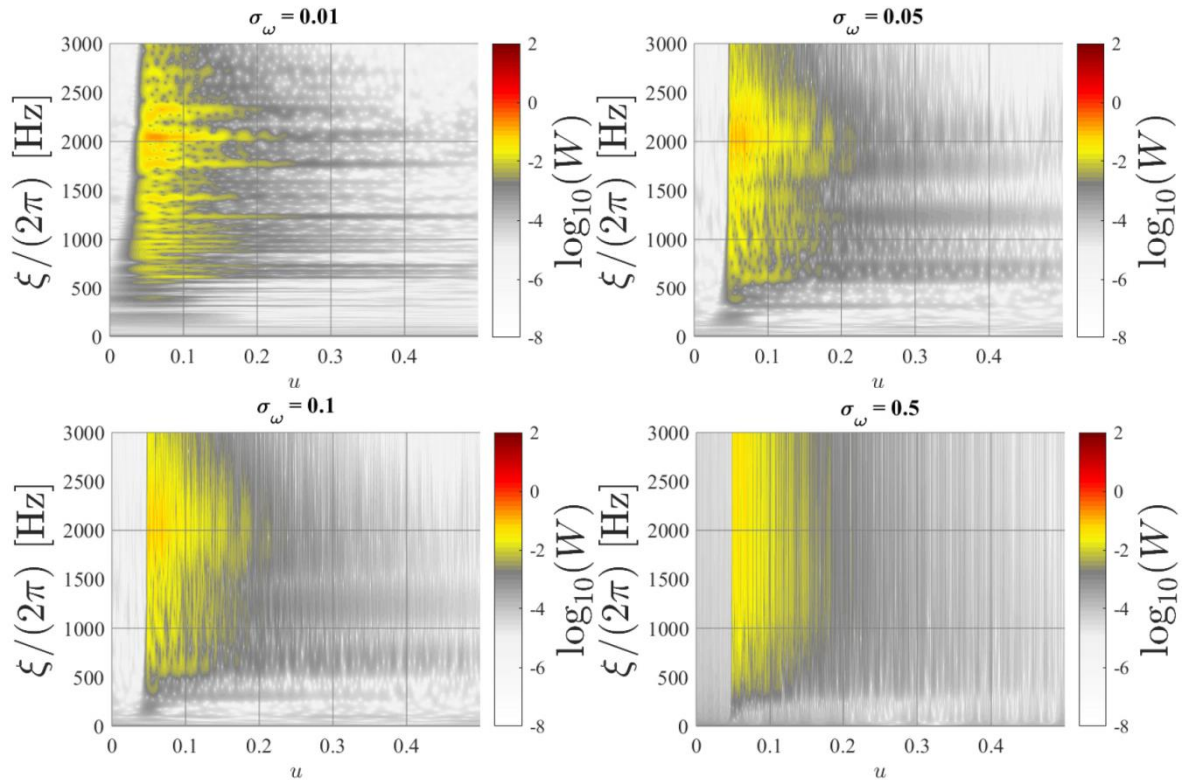


Obr. 3: Odhad místa rázového buzení z rozdílů časový průběhů mezi referencí a měřeným místem s využitím standardní triangulační metody; červená kolečka ilustrují poměr mezi referencí a odezvou na přímé spojnici těchto bodů

Detekce příchodu rázové vlny vlnkovou transformací

Vlnková transformace (*wavelet transform*, WT) je podobně jako krátkodobá Fourierova transformace (STFT), Hilbertova-Huangova transformace nebo Wignerovo-Villeovo rozdělení, vhodná pro časově-frekvenční analýzu nestacionárních dat. Na rozdíl od Fourierovy transformace však WT nepoužívá k rozkladu signálu ortogonální bázi trigonometrických funkcí, ale takzvané vlnky. Vlnkové funkce se volí na základě dané úlohy [2]. Výsledkem není jako v případě STFT spektrogram, ale škálogram (angl. *scalogram*).

V případě lokalizace rázu byly dobré výsledky dosaženy při použití tzv. Gaborovy nebo také Morletovy vlnky. Nespornou výhodou této vlnky je její snadná převoditelnost do frekvenční oblasti a poměrně snadné nastavení volných parametrů. Nejdůležitějším parametrem je dilatace vlnky, angl. též *frequency spread* σ_{ω} [2, 3]. Hodnota dilatace vlnky σ_{ω} značně ovlivňuje výsledky, viz obr. 4.



Obr. 4: Škálogram s využitím vlnkové transformace pro různá nastavení dilatace vlnky σ_ω

Na základě výpočtu WT pro několik signálů a hodnot σ_ω bylo ověřeno, že pro určení času příchodu rázové vlny je vhodné volit σ_ω v rozmezí $0.5 < \sigma_\omega < 2$.

Čas, kdy rázová vlna dorazí do měřeného místa je určen jako čas, kdy ve škálogramu dojde k významné změně. Jak ukazuje obr. 4, k nejvýznamnějším změnám dochází ve frekvenčním pásmu od 2000 do 3000 Hz. Čas příchodu rázové vlny v konkrétním signálu je pak určen jako průměr časů příchodu na každé frekvenční čáře v tomto frekvenčním pásmu. Časové řady na jednotlivých frekvenčních čarách jsou zpracovány metodou popsanou v [4, 5].

Princip lokalizace rázu

Jak již bylo řečeno, u obecného zařízení není známá cesta, po které rázová vlna dorazila ke konkrétnímu snímači. Z toho důvodu není známá zdánlivá rychlost vlny v jednotlivých měřicích bodech a polohu rázu nelze určit triangulací. Princip zde představené metody nicméně z triangulace vychází

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{M}_n\| - v_n \|\mathbf{T}_n\| = 0 := S_n, \quad (1)$$

kde $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]$ jsou neznámé souřadnice polohy rázu, \mathbf{M}_n je vektor polohy n -tého snímače vibrací, \mathbf{T}_n je vektor času, kdy dorazila vlna ke snímači v jednotlivých směrech kartézského systému a v_n zdánlivá rychlost vlny. Zdánlivá rychlost vlny v_n zahrnuje několik faktorů, které ovlivňují čas, za jaký se vlny dostávají ke snímačům. Hlavním faktorem je celková délka cesty, kterou vlna putuje ke snímači. Tento faktor je dán především konstrukčním řešením měřeného objektu. Dalším neméně důležitým faktorem je přechod materiálovým rozhraním, neboť v různých materiálech se rázové vlny šíří různou rychlostí. Skořepinami se navíc může šířit několik vln o různých rychlostech – nejznámějšími jsou podélné a příčné vlny [7].

Celkem je k měření použito N snímačů, a proto lze z rovnice (1) sestavit soustavu

$$\mathbf{s} = \begin{cases} S_1, \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_N, \end{cases} \quad (2)$$

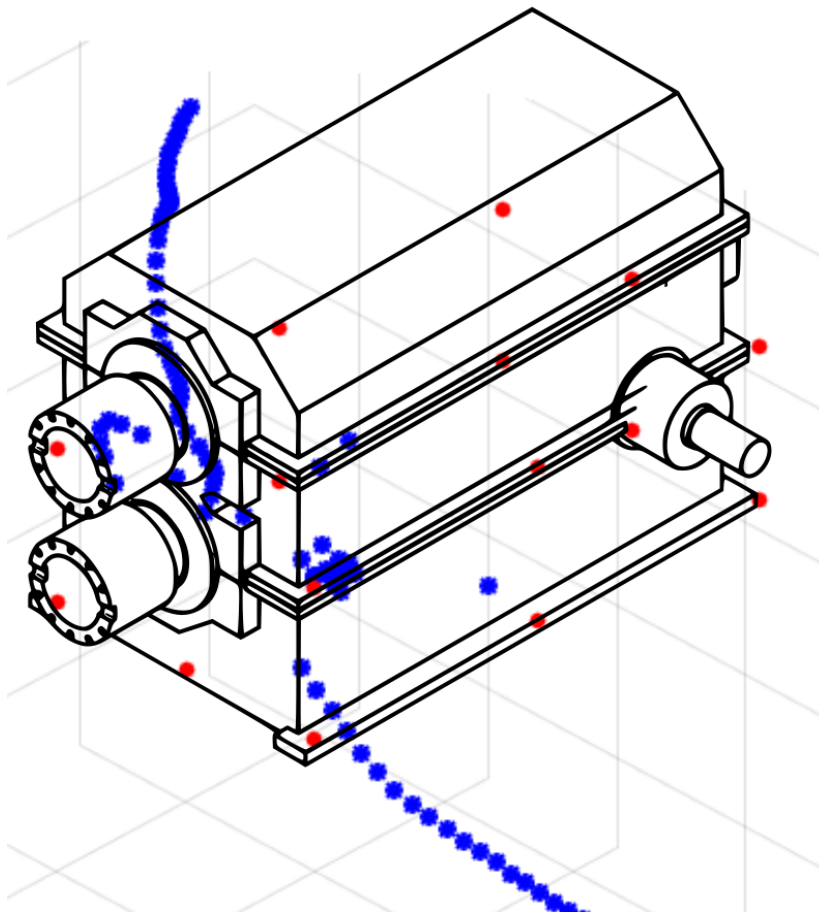
která je pro potřeby optimalizace transformována do tvaru

$$\sqrt{S_1 + S_2 + \dots + S_N} = 0. \quad (3)$$

Vhodné počáteční podmínky lokalizaci rázu jsou získány triangulační metodou, kdy jsou zdánlivé rychlosti v jednotlivých bodech nahrazeny konstantní rychlostí, která je může být stanovena náhodně nebo jako rychlost podélné vlny v oceli. Vektor neznámých souřadnic $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]$ je pro potřeby optimalizace omezen tak, aby ráz nemohl být lokalizován na nesmyslném místě.

Aplikace metody

Na obr. 5 jsou ukázány výsledky navržené metody. Je patrné, že řešení optimalizačního problému pro určitý interval počátečních podmínek konverguje do stejného místa převodovky (shluk modrých bodů v blízkosti výstupních hřídelů). Toto místo skutečně odpovídá zubové vazbě mezi výstupními hřídeli.



Obr. 5: Červené tečky znázorňují umístění akcelerometrů, modré tečky výsledky lokalizace rázového buzení; různé výsledky jsou dány různými počátečními podmínkami optimalizace

Závěr

V článku byla představena metoda pro lokalizaci rázového buzení. Tato metoda zahrnuje naměření odezvy na buzení pomocí snímačů zrychlení a analyzátoru schopného zaznamenat vibrační signál se vzorkovací frekvencí vyšší než 100 kHz. Naměřená odezva je dále podrobena vlnkové transformaci pomocí Gaborovy vlnky. Ze získaných škálogramů jsou určeny časy, kdy rázová vlna dorazí ke snímači. Tyto časy jsou společně s vhodně zvolenými počátečními podmínkami použity v optimalizačním procesu, který hledá neznámou polohu rázového buzení a zdánlivé rychlosti vlnění v jednotlivých bodech. Výstupem optimalizačního procesu je poloha rázového buzení v technologii pro danou sadu počátečních podmínek. Vzhledem k tomu, že není zajištěna existence globálního optima, je nutné optimalizaci provést pro různé sady počátečních podmínek. Poloha rázového buzení pak odpovídá limitnímu bodu, ke kterému se přibližují výsledky jednotlivých optimalizací.

Výše popsaná metoda byla úspěšně nasazena při hledání neznámého rázu ve velké převodovce, kde bez nutnosti demontáže technologie odhalila, které ozubení způsobuje rázové buzení. Tuto metodu lze využít i v jiných aplikacích, kde dochází k pravidelným či nepravidelným rázům, dotekům či jiným poruchám vyvolávajícím rázy, které je potřeba přesně lokalizovat.

Poděkování

Príspevek vznikl v rámci institucionální podpory na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace poskytnuté Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky.

Literatura

- [1] Smolík, L., Pašek, R. (2020): Využití vysokorychlostní kamery v diagnostice strojů. *DIAGO 2020, Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení*, VŠB – TU Ostrava, Sněžné – Milovy, str. 132-139, 2020. ISBN 978-80-248-4380-3
- [2] Carassale, L., Marrè-Brunenghi, M., Patrone, S. (2018): *Wavelet-based identification of rotor blades in passage-through-resonance tests*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 98, pp. 124-138. ISSN 0888-3270
- [3] Carassale, L., Marrè-Brunenghi, M., Patrone, S. (2015): Estimation of damping for turbine blades in non-stationary working conditions. *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*, ASME, Montreal (Quebec, Canada), paper GT2015-42945. ISBN 978-0-7918-5677-2
- [4] Jackson, B., Scargle, J. D., Barnes, D., Arabhi, S., Alt, A., Gioumousis, P., Gwin, E., Sangtrakulcharoen, P., Tan, L., Tsai, T. T. (2005): *An algorithm for optimal partitioning of data on an interval*. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 12, pp. 105-108. ISSN 1070-9908
- [5] Killick, R., Fearnhead, P., Eckley, I. A. (2012): *Optimal detection of changepoints with a linear computational cost*, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 107(500), pp. 1590-1598. ISSN 0162-1459
- [6] Houdek, V., Kubín, Z., Smolík, L. (2021): Impact point localization with the use of wavelet transform. *Dynamical Systems – Theory and Applications*, Łódź University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Automation, Biomechanics and Mechatronics, Łódź (Poland). (in print)
- [7] Mračko, M., Adámek, V., Berezovski, A., Kober, J., Kolman, R. (2021): *Experimental, analytical, and numerical study of transient elastic waves from a localized source in an aluminium strip*. *Applied Acoustics*, Vol. 178, paper 107983. ISSN 0003-682X