

ANALÝZA DYNAMICKO-AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ ŽELEZNIČNÍCH KOL S TLUMIČI TYPU SCHRAY&VEITH PROGRAMOVÝMI PROSTŘEDKY SYSTÉMU MATLAB

Jaroslav Smutný, Luboš Pazdera

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb a Ústav fyziky,
Veveří 95, 662 37 Brno

Abstrakt

Príspevek se zabývá měřením a analýzou dynamicko-akustických parametrů železničních kol ORE ϕ 920 mm bez akustických tlumičů a s radiálními tlumiči typu Schrey & Veith.

K hodnocení účinnosti akustických tlumičů byla navržena komplexní metodika zahrnující jednak osvědčené postupy a jednak postupy zahrnující současné moderní trendy v oblasti měřicí techniky a zpracování měřených dat. K analýze signálů byly použity programové prostředky systému Matlab.

1. Úvod do problematiky

Velmi důležitý zdroj hluku, který zatěžuje životní prostředí, představuje konstrukční systém kolo-kolejnice. Tzv. hluk z valení je způsobován vibracemi struktur kol a koleje. Tyto vibrace jsou iniciovány zejména tvarovými nepravidelnostmi (případně drsností) obou styčných ploch v místě dotyku. Železniční kolo představuje málo tlumený, rezonující konstrukční díl. Na základě dřívějších analýz je známo, že ve frekvenčním pásmu mezi 100 Hz a cca 10 kHz dochází k axiálním a radiálním vibracím, případně ke kombinaci obou. Tyto vibrační jevy se významně podílejí na vzniku a vyzařování hluku.

Jedním z účinných opatření vhodných ke snížení vyzařovaného hluku se může stát použití železničních kol s akustickými tlumiči. Při použití kol s akustickými tlumiči lze očekávat snížení průměrných ekvivalentních hladin hluku o cca 4 dB(A) až 6 dB(A).

Nové koncepce akustických tlumičů se posuzují zejména s využitím experimentu. Měření na vzorku se realizují jednak v laboratorních podmínkách (obvykle k odzkoušení a naladění daného tlumiče) a jednak v terénu (obvykle z důvodu ověření účinnosti tlumičů při provozu).

V dalším textu je prezentována metodika laboratorních měření akusticko-vibračních parametrů železničních kol ORE ϕ 920 mm, srovnávací měření a analýza kola (dvojkolí) bez a s aplikací radiálních tlumičů Schrey & Veith. Tento tlumič je vytvořen ze 7 kovových destiček proložených gumou s postupně se zmenšující tloušťkou. Je umístěn na vnitřní straně kola dle obr. 1.

2. Metodika měření a analýzy

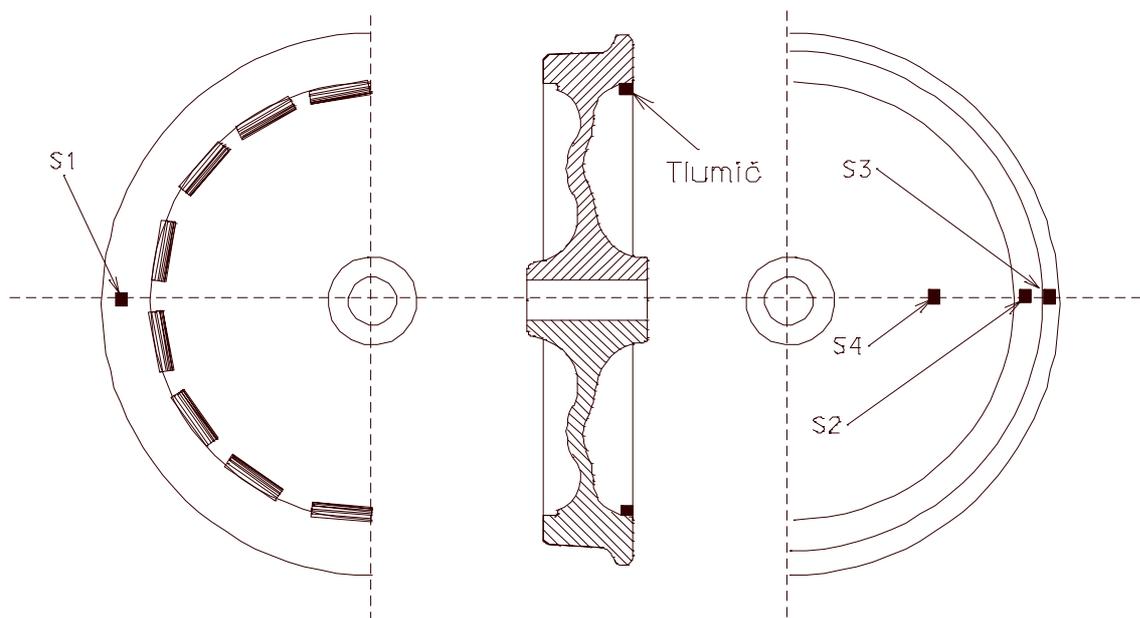
Vlastní laboratorní měření akusticko-vibračních parametrů železničních kol bez tlumičů a s tlumiči typu Schrey & Veith bylo realizováno v průběhu měsíců ledna až března roku 2000 v mechanické laboratoři Ústavu železničních konstrukcí a staveb.

Ke srovnání a testování železničních kol opatřených tlumiči a bez tlumičů byla použita metoda měření odezvy na mechanický ráz. Buzení rázem je výhodné pro určení vlastních

frekvencí dané soustavy, neboť ráz, dle teorie, vybudí všechny frekvence, zejména rezonanční. Mechanický ráz byl realizován dopadem ocelové koule (hustota = $7800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměr = 46 mm, hmotnost = 0,5 kg) spouštěné ze speciálního zařízení (s nastavitelnými výškami). Měřené kolo bylo zavěšeno ve speciálně navrženém stojanu na klínových řemenech formou tzv. volně volného uložení. Osa kola byla umístěna ve výšce 0,95 m nad podlahou.

Koule byly spouštěny axiálně (místo úderu ze strany okolku 40 mm od horního okraje) a radiálně (místo úderu ve středu pojezdové plochy kola) s definovaným převýšením 0,5 m. Rázové buzení bylo aplikováno ve čtyřech navzájem o 90° pootočených polohách.

Parametry dynamicko-akustické odezvy byly snímány mikrofonem a snímači zrychlení. Mikrofon byl uchycen ve stativu a umístěn ve vzdálenosti 1 m od středového náboje měřeného kola a ve výšce osy dvojkolí, tedy ve výšce 0,72 m nad podlahou. Snímače zrychlení (S1 až S4) byly umístěny na kolech v pozicích dle obr. 1.



Obr. 1 Schematické znázornění železničního kola a umístění akcelerometrických snímačů

Parametry dynamicko-akustické odezvy, tedy hladiny akustického tlaku a zrychlení byly měřeny současně při aplikaci rázového buzení, tj. při jednom dopadu budící koule. Odezva na mechanický ráz byla měřena soupravou zahrnující přístroje pro měření akustických parametrů a vibračních parametrů od firmy Brüel&Kjaer. Po provedeném rozboru, realizovaných kontrolních měřeních a výpočtech, bylo použito k analýze odezvy na mechanický ráz následujících metod a parametrů:

➤ **Při snímání měřených dat mikrofonem**

1. hladiny impulsního hluku L_I a maximální hladiny hluku L_{max}
2. časového zobrazení průběhu okamžité hodnoty hladina hluku L , z něhož byl následně vyhodnocen pokles hladiny hluku a stanovena konstanta tlumení (doznívání)
3. frekvenční analýzy s využitím průběhu spektrální výkonové hustoty v lineárních a logaritmických osách (pro přechod z časové do frekvenční oblasti byl použit algoritmus rychlé Fourierovy transformace.)
4. časově-frekvenčních metod spektrální analýzy (pro přechod z časové do časově-frekvenční oblasti byl použit algoritmus Krátkodobé Fourierovy transformace)

➤ **Při snímání měřených dat akcelerometrickým snímačem**

1. časového zobrazení průběhu okamžité hodnoty zrychlení
2. frekvenční analýzy s využitím průběhu spektrální výkonové hustoty v lineárních a logaritmických osách (pro přechod z časové do frekvenční oblasti byl použit algoritmus rychlé Fourierovy transformace.)
3. časově-frekvenčních metod spektrální analýzy (pro přechod z časové do časově-frekvenční oblasti byl použit algoritmus Krátkodobé Fourierovy transformace)

3. Teoretický úvod do analýzy měřených signálů

K frekvenční analýze byla použita Welchova metoda. Tato metoda je založena na použití diskrétní Fourierovy transformace aplikované na naměřená data, na následném výpočtu kvadrátu modulu a vhodném průměrování. Dílčí spektrogram je určen vztahem:

$$S_i[k] = \frac{1}{U \cdot M^2} \cdot \left| \sum_{m=0}^{M-1} x[m + i \cdot M] \cdot w[m] \cdot e^{\left(\frac{-j2\pi mk}{M}\right)} \right|^2, \quad (1)$$

kde

$$U = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} w^2[m] \quad (2)$$

zde U je norma vektoru okénkové funkce, $w[m]$ je okénková funkce, x představuje digitalizovaný signál, k počet segmentů, M počet dat v segmentu a j je imaginární jednotka.

Výsledný vyhlazený odhad se získá průměrováním dle vztahu

$$\hat{S} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} S_i[k]. \quad (3)$$

Je vhodné poznamenat, že frekvenční analýza aplikovaná na měřený signál poskytla informaci o všech frekvenčních složkách obsažených v celém odezvoovém signálu.

Pro určení časové lokalizace frekvenčních komponent nelze použít klasický postup frekvenční analýzy, ale je nutné využít jiný transformační postup, případně jinou výpočetní metodu. Jedním z možných postupů, jak analyzovat časový výskyt frekvenčních složek přechodových a nestacionárních signálů, je použití Krátkodobé Fourierovy transformace (STFT). Tato lokalizuje frekvenční složky v čase s konstantním (lineárním) rozlišením. Základním principem je rozdělení signálu na dostatečně malé realizace, u nichž je možno předpokládat dostatečnou stacionaritu (ergodicitu). To je provedeno multiplikací jisté okénkové funkce a signálu. Na každém takovém výřezu je provedena Fourierova transformace (FT). Okénko se posouvá v čase. STFT poskytuje kompromis mezi časovou a frekvenční reprezentací signálů. Její definiční integrál je

$$STFT(t', f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot g^*(t - t')] \cdot e^{-j2\pi f(t-t')} \cdot dt, \quad (4)$$

kde g je okénková funkce, $*$ komplexní konjunkce, t' časové posunutí okénka, $x(t)$ je časová reprezentace signálu a $STFT(t', f)$ je jeho časově-frekvenční reprezentace.

Protože STFT je počítána Fourierovou transformací okénkem upraveného signálu, je při prezentaci výsledků často používán přepočtení na amplitudové spektrum, spektrální výkon nebo spektrální výkonovou hustotu. Je nutno podotknout, že je vhodné časově frekvenční zobrazení spektra doplnit o případné frekvenční a časové řezy.

4. Zhodnocení výsledků

K hodnocení naměřených signálů byl využit program Matlab s knihovnou Signal Processing. Součástí této knihovny jsou jak časové a frekvenční (Fourierovy transformace a její modifikace), tak i časově frekvenční postupy (zejména Krátkodobá Fourierova transformace).

V tomto programovém prostředí byl vytvořen komplexní programový systém k realizaci měření a následnému zpracování naměřených dat. Použité knihovní funkce byly náležitě upraveny a optimalizovány pro potřeby akusticko vibračních měření a analýz. Z důvodu omezeného prostoru k prezentaci výsledků v dalším textu bude uvedena analýza akustické odezvy na mechanický ráz v radiálním směru.

Na obr. 2 je uvedena analýza odezvy kola s tlumiči Schrey&Veith na impuls generovaný úderem koule o hmotnosti 0,5 v radiálním směru (výška dopadu 0,5 m).

Z časového průběhu tlaku je patrna maximální hodnota tlaku 4 Pa při dopadu koule na plochu obvodu kola. Amplitudové spektrum vyhlazené Welchovou metodou vykazuje význačné hodnoty na frekvencích na 2 kHz, 2,8 kHz, 3,4 kHz a 4,1 kHz, které nejsou vzhledem k maximální hodnotě nižší o více jak 20 dB. Maximální hodnota je na 2,8 kHz. Z amplitudového spektra vytvořeného pomocí Krátkodobé Fourierovy transformace je patrna maximální hodnota na frekvenci kolem 2,8 kHz. Při znázornění tohoto spektra v decibelové (logaritmické) stupnici je patrné maximum v oblasti od 2,4 kHz do 4,2 kHz dosahující hodnoty až 100 dB. Význačné složky jsou také na frekvencích 1,9 kHz a 2 kHz. Nejdéle se v signálu vyskytuje frekvenční složka 2,8 kHz a to od úderu po dobu 0,25 s.

Na obr. 3 je uvedena analýza odezvy kola bez tlumičů Schrey&Veith na impuls generovaný úderem koule o hmotnosti 0,5 kg. Úder koule byl realizován v radiálním směru z výšky 0,5 m. Z časového průběhu tlaku je patrna maximální hodnota tlaku 6 Pa při dopadu koule na plochu obvodu kola.

Amplitudové spektrum vyhlazené Welchovou metodou vykazuje význačné hodnoty na frekvencích 2,8 kHz a 3,4 kHz, které nejsou vzhledem k maximální hodnotě nižší o více jak 20 dB. Maximální hodnota je na 2,8 kHz. Z amplitudového spektra vytvořeného pomocí Krátkodobé Fourierovy transformace je patrna maximální hodnota na frekvenci kolem 2,8 kHz a 3,4 kHz. Při zobrazení tohoto spektra v decibelové (logaritmické) stupnici je patrné maximum v oblasti od 2,8 kHz do 2,9 kHz dosahující hodnoty až 100 dB. Význačné hodnoty jsou také na frekvencích 2 kHz a 3,3 kHz. Nejdéle se v signálu vyskytuje frekvence 2,8 kHz a to od úderu po dobu 2 s.

Obr. 4 a 5 zobrazují časové řezy nejvýznamnější frekvenční složky obsažené v měřeném signálu pro kolo s tlumiči (obr. 4) a kolo bez tlumičů (obr. 5).

U odezvy generovaných radiálním úderem koule o hmotnosti 0,5 kg z výšky 0,5 m na kolo bez tlumičů a s tlumiči je patrna změna jak v časovém tak i frekvenčním prostoru. Časový průběh bez tlumičů (obr. 3) ukazuje pravděpodobně exponenciální útlum s dlouhou časovou konstantou, kdežto u kol s tlumiči (obr. 2) je tato časová konstanta podstatně menší.

Z amplitudového spektra vypočteného metodou Welch lze usuzovat, že se zmenší rozdíl mezi hodnotami akustického tlaku na význačných frekvenčních složkách. Z časově-frekvenčního spektra vypočteného okénkovou Fourierovou transformací je patrný u kola s tlumiči podstatně větší počet význačných frekvenčních složek, avšak tyto složky jsou časově podstatně rychleji utlumeny. Velikost maximálního tlaku je přibližně dvoutřetinová ve prospěch kola s tlumiči. Rozdíl ve frekvenčních spektrech není příliš patrný. Maximální frekvenční složka je v obou případech v oblasti od 1,5 kHz do 4,5 kHz. U kola bez tlumičů má tato složka dlouhé trvání. Útlum o 20 dB je asi za 1 s na rozdíl od kola s tlumiči, kde je tento útlum téměř v desetinásobně menším časovém úseku 0,1 s.

5. Závěry vyplývající z měření a analýz

Závěrem lze konstatovat, že z naměřených hodnot a z uvedených grafů vyplývají výrazně výhodnější akusticko vibrační parametry pro kola s tlumiči typu Schrey & Veith. Tato skutečnost se projevuje jak u axiálního, tak radiálního buzení.

Získané závěry je však nutno ověřit praktickými měřeními v terénu. Navržená metodika dobře poslouží zejména k ověření a ladění nových akustických tlumičů v laboratorních podmínkách.

Na základě provedených měření a analýz lze konstatovat, že použitá metodika laboratorních měření a analýz poskytuje dobré výsledky a závěry. Měření i vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypovídající schopností. Lze rovněž konstatovat, že ke kvalitnímu zpracování provedených měření výrazně přispěly moderní prostředky signálové analýzy, zejména pak Krátkodobá Fourierova transformace. Tato metoda poskytuje časovou lokalizaci frekvenčních komponent obsažených v měřeném signálu (hladina akustického tlaku, zrychlení).

Analýza signálů získaných při měření a analýze odezvy na mechanický ráz poskytuje nový detailnější pohled na přechodové a nestacionární charakteristiky konstrukcí železničních kol. Tím poskytuje materiál pro důkladnou analýzu, která může být důležitá pro následnou optimalizaci. Nezanedbatelná je i skutečnost, že časově frekvenčními postupy analyzované dynamické zatížení poskytuje reálné vstupy pro následné sestavení matematických modelů.

K analýze měřených signálů bylo s výhodou využito velmi flexibilního prostředí programového produktu Matlab, resp. jeho knihovních funkcí. Je zřejmé, že tento systém je možné použít nejen pro teoretické výpočty, ale i pro analýzy reálně změřených veličin.

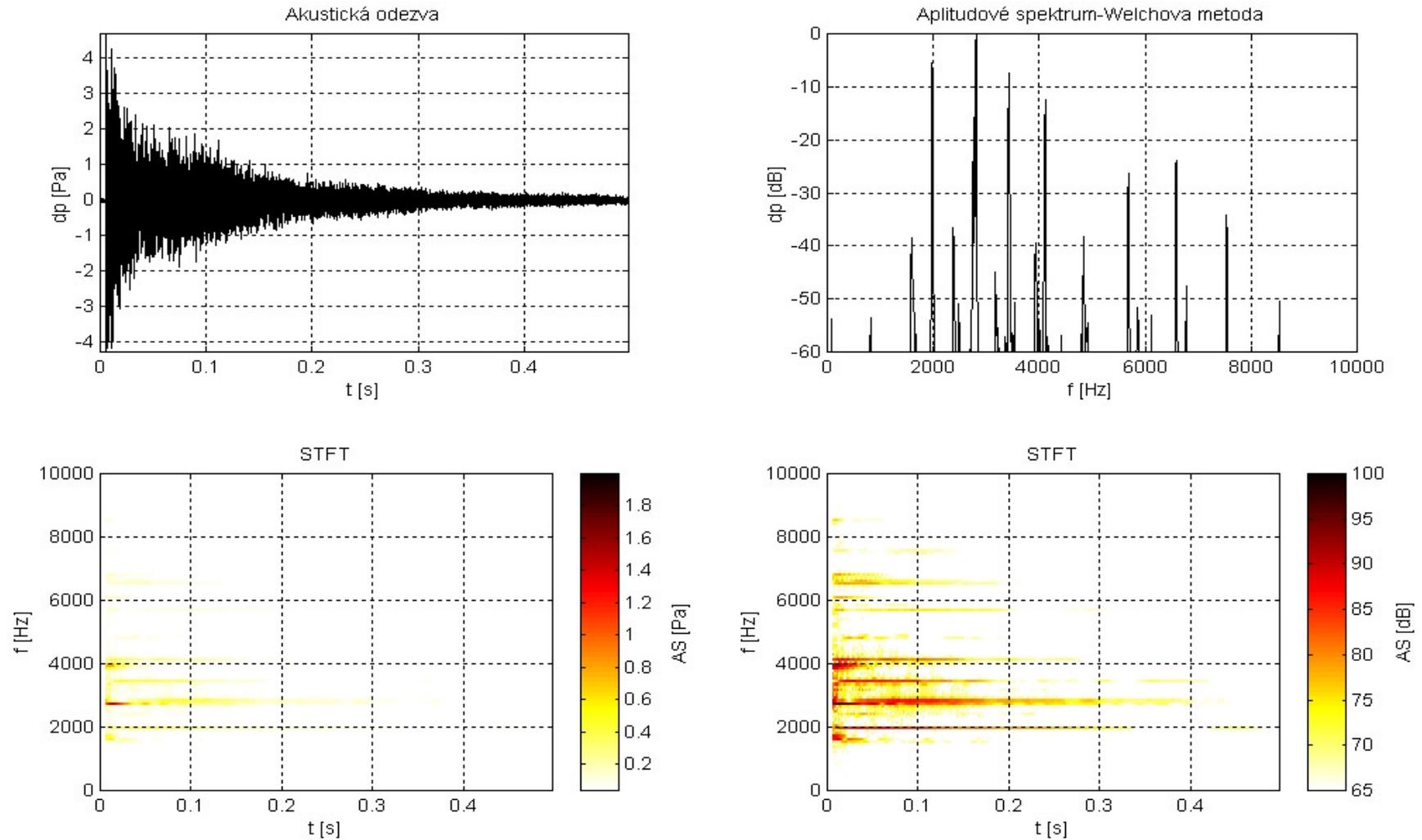
Použitá literatura

- [1] Firemní dokumentace k programu Matlab
- [2] Poularikas A. D.: The Transform and Applications Handbook, IEEE Press, 1996
- [3] Smutný J.: Modern methods of noise and vibration analysis applied to rail transport, Ph.D. Thesis, Faculty of Civil Engineering, Technical University Brno, Czech Republic, 1998, pp. 170
- [4] Kaloč R.: Styk kola s kolejnicí jako akustický zdroj, Současné problémy v kolejových vozidlech, sborník přednášek XIII. Mezinárodní konference, 9/1997, Česká Třebová, ČR, ISBN 80-7194-105-0
- [5] Kout J., Kaloč R.: K problematice hluku kolejového vozidla, Vědeckotechnický sborník ČD, 9/1998, ISSN 1211-2321
- [6] Pazdera L., Smutný J.: Measurement and Analysis the Tram Wheel with Noise and Vibration Dampers, International Conference – New Requirements for Material and Structures, Czech Technical University, Faculty of Civil Engineering, Prague, 29-30 September 1998, pp. 315-318, ISBN 80-01-01838-5
- [7] Smutný J., Pazdera L.: Modern methods of noise and vibration analysis applied to rail transport, Mezinárodní vědecká konference - 60. Výročí stavební fakulty STU v Bratislavě – sekce inženýrské konstrukce a dopravní stavby, Slovenská technická universita, Bratislava, 11/1998, str. 355-360, ISBN 80-227-1129-2

Poděkování

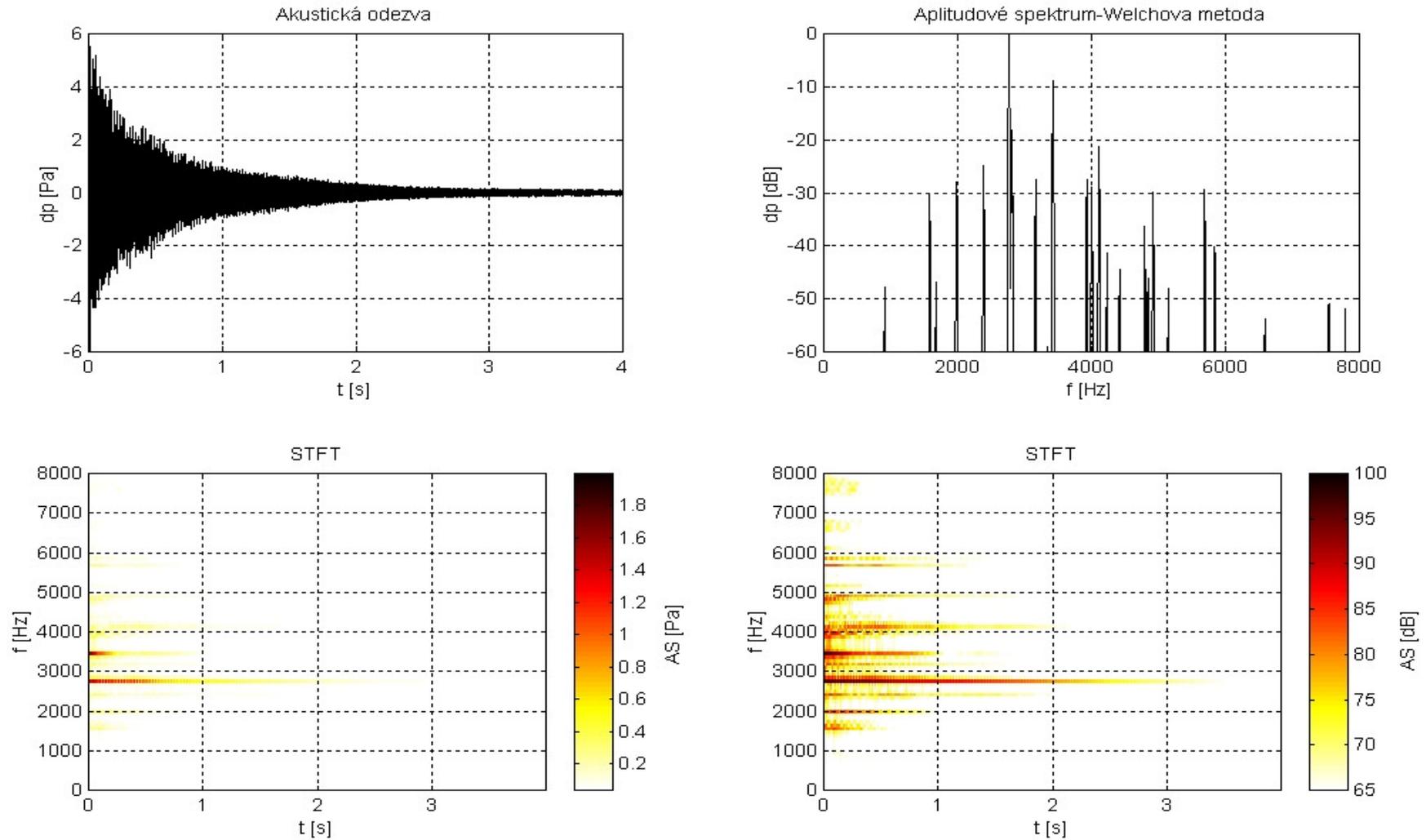
Příspěvek byl vypracován za podpory výzkumného záměru MŠMT registrační číslo CEZ:J22/98:261100007.

Kolo s tlumiči Schrey & Veith, hmotnost budící koule 0.5 kg, radiální buzení, h=0.5 m



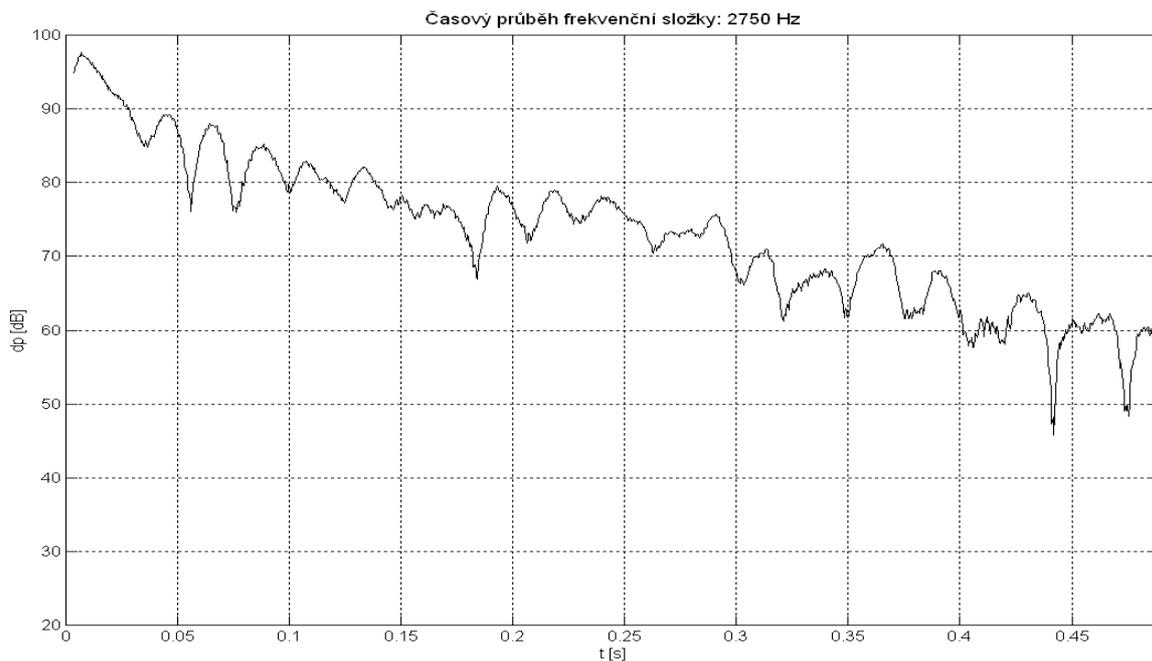
Obr. 2 Analýza akustické odezvy železničního kola s tlumiči Schray & Veith, radiální buzení

Kolo bez tlumičů Schrey & Veith, hmotnost budící koule 0.5 kg, radiální buzení, h=0.5 m



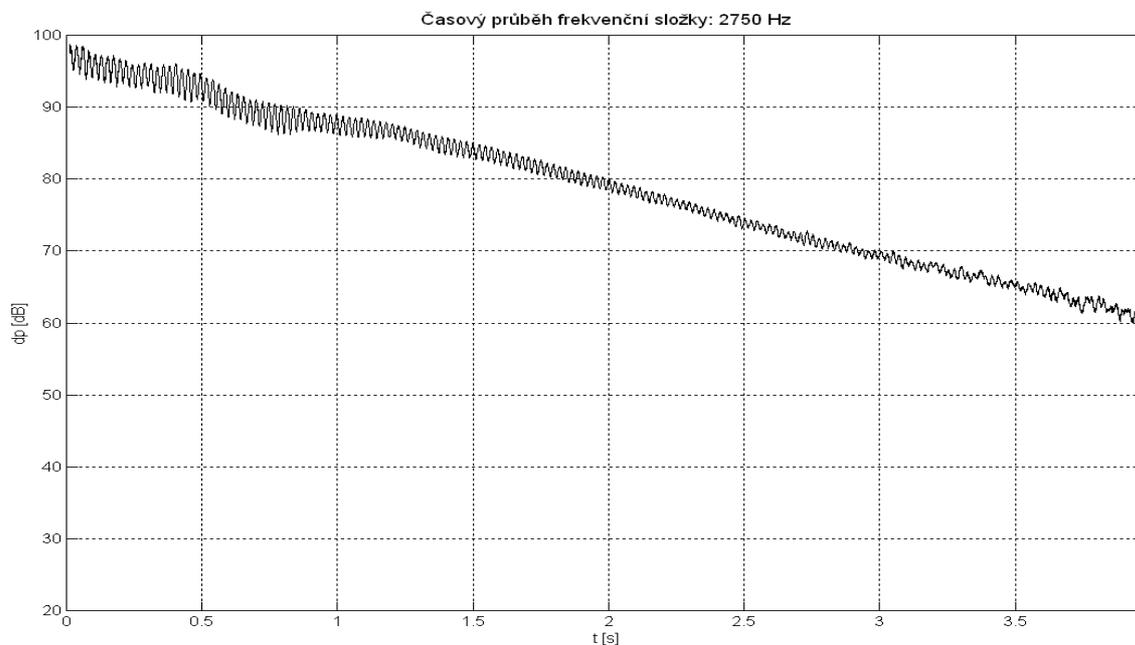
Obr. 3 Analýza akustické odezvy železničního kola bez tlumičů Schray & Veith, radiální buzení

Kolo s tlumiči Schrey & Veith, hmotnost budící koule 0.5 kg, radiální buzení, $h=0.5$ m



Obr. 4 Železniční kolo s tlumiči Schray & Veith, radiální buzení, časový průběh nejvýznačnější frekvenční složky

Kolo bez tlumičů Schrey & Veith, hmotnost budící koule 0.5 kg, radiální buzení, $h=0.5$ m



Obr. 5 Železniční kolo bez tlumičů Schray & Veith, radiální buzení, časový průběh nejvýznačnější frekvenční složky