

## CONTRIBUTION TO EXPERIMENTAL RESEARCH OF VIBRO-ACOUSTICS OF RAILWAY WHEELS WITH ADD-ON DAMPERS

L. Pešek, F. Vaněk, J. Veselý, J. Cibulka<sup>\*</sup>, T. Boháč<sup>\*\*</sup>

**Summary:** *In the contribution a method of measurement and dynamic analysis of the recent operational tests of the monobloc wheel with/without damping elements is presented. On the basis of time-frequency analysis of operational vibration and experimental modal analysis of the wheel its dynamic behavior is described. The vibro-acoustic coupling is analyzed from the comparisons of vibration and sound pressure spectrograms. At passing the curve, the formation and modal-frequency composition of squealing noise is observed and there are identified vibrational modes that mostly contribute to noise emission into surrounding. For quantitative comparison of individual wheel solutions the third octave analysis is used.*

### 1. Úvod

V rámci dlouhodobého vývoje nových železničních kol s optimalizovanými vibro-akustickými vlastnostmi vyráběných v Bonatrans a.s., probíhá numerické modelování kol, jejich dynamické a vibro-akustické zkoušky v laboratořích i v provozu na tratích. Vedle složených tramvajových kol, v nichž jsou zabudovány pryžové segmenty pro tlumení vibrací se vyvíjí i monobloková kola s přídatnými tlumícími členy, jež vedle pohlcování vibrací také brání šíření hluku generovaného z kmitajících kol.

V tomto příspěvku je popsána metodika měření a způsob dynamické analýzy provozního srovnávacího měření kol s přídatným tlumícím členem a bez tlumícího členu, jež se uskutečnilo na vozu soupravy METRA Praha, nejprve na zkušebním okruhu DEPA Zličín a dále na trase metra linky B pro různé hodnoty rychlosti (do 60km), režimy brždění a tvaru dráhy (přímá, oblouk). Tlumící člen složený z půlené mezikruhové desky s pryžovou vrstvou byl navržen v Bonatrans a.s.

Vedle měření vibrací na věnci kola, desce kola a tlumiči v radiálním i axiálním směru byl pro monobloková kola proti desce kola umístěn mikrofón pro měření akustického tlaku. Výstupní signál z akcelometrů se vysokofrekvenčně přenášel radiotelemetrickou aparaturou vyvinutou v ÚT, jež se skládá z miniaturního vysílače FM s bateriovým napájením na

<sup>\*</sup> Ing. Luděk Pešek, CSc., Ing. František Vaněk, CSc., Ing. Jan Veselý, Jan Cibulka: Ústav termomechaniky AV ČR; Dolejškova 5; 182 00 Praha 8; tel.: +420.266 053 083, fax: +420.286 584 695; e-mail: pesek@it.cas.cz

<sup>\*\*</sup> Ing. Tomáš Boháč, Bonatrans a.s., Bezručova 300, 735 94 Bohumín, tel.: +420.597083176, e-mail: tbohac@bonatrans.cz

přijímací anténu uchycenou k ložiskové skříni nápravy. Demodulovaný signál z přijímačů se signálem fázové značky a signálem z hlukoměru byl současně zaznamenáván číslicovým osciloskopem. Tyto signály byly zpětně zpracovávány v časové i frekvenční oblasti.

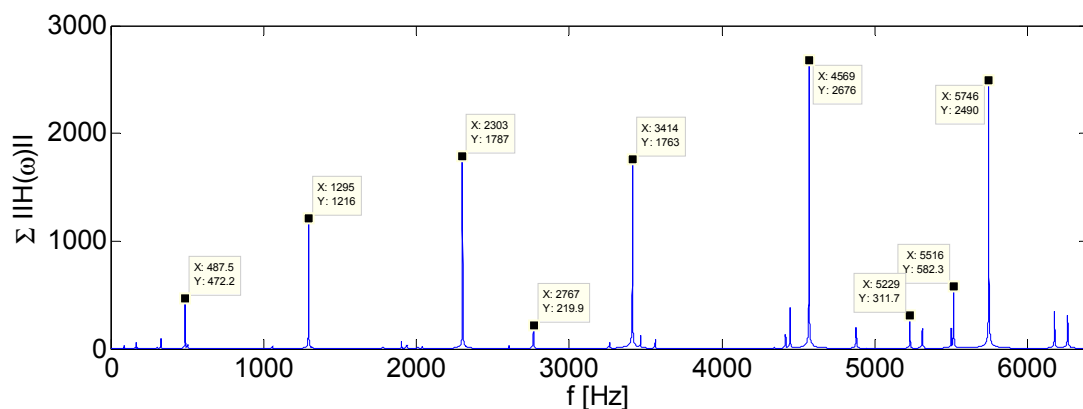
Na základě frekvenční analýzy provozního kmitání a experimentální modální analýzy kola (Pešek&Veselý, 2006) je zde popsáno jejich dynamické chování při jízdě v oblouku. Při jízdě obloukem je patrný vznik a frekvenčně-modální složení hluku pískání kol. Tento „kvílivý“ hluk je intenzivně zkoumán na případu brzdných kotoučů například v pracích Tuchinda et al. (2002), Allgaier et al. (2002) a Giannini&Massi (2004). Pro kvantitativní porovnání naměřených výsledků jednotlivých řešení kol bez a s tlumičem jsou použita třetinooktávové spektra výkonové hustoty.

## 2. Modální analýza železničního kola

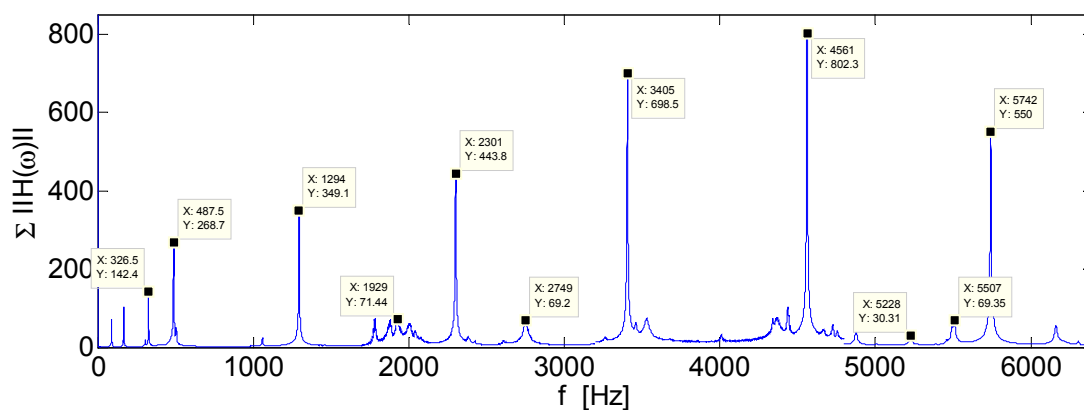
Dvojkolí bylo uloženo horizontálně do dvou stojanů. Buzení v axiálním směru bylo realizováno na vnější straně věnce železničního kola pomocí výkonného vibrátoru B&K 4818. Pro řízení a sběr dat zatěžování byl použit měřicí systém Pulse 9.0 výrobce B&K. Pro dynamické zatěžování byl použit náhodný generátor buzení s rozsahem do 6.4kHz a frekvenčním krokem 0.25Hz. Funkce frekvenčního přenosu byly vyhodnocovány lineárním průměrováním z čtyřvteřinových časových záznamů.

Silový budicí signál byl snímán siloměrem B&K8200 umístěným mezi budičem a čelní plochou věnce kola, na kterou byl přilepen. Nábojový signál buzení byl transformován na napětí předzesilovačem B&K2647A. Odezvy kola byly snímány postupně ve 270 bodech (9kružnic po 30bodech) jednosložkovým ICP akcelerometrem B&K4508. Vlastní frekvence, ztrátové součinitele a modální součinitele byly vyhodnoceny z naměřených funkcí frekvenčního přenosu (FP) mezi budícím a odezвовým signálem. Identifikace modálních parametrů byla prováděna metodou vyhlazení ve frekvenční oblasti označovanou Polynomial programem MeScope Package VT-550 výrobce Vibrant Technology, Inc. Vliv budiče na výsledky měření byl vyhodnocen kladívkovou metodou.

Na obr. 1 a 2 jsou vykresleny tzv. sumační funkce frekvenčních přenosů ( $FFP = \sum \|H(\omega)\|$ ) získané součtem FFP všech 270 konfigurací budič-snímač pro případ kola bez akustické tlumicí desky resp. s půlenou tlumicí deskou s úrovní buzení 100N pro pásma 0-6400Hz. Na obrázcích jsou označeny souřadnice významných rezonancí (X: označuje frekvenci a Y: amplitudu funkce přenosu [ $\text{ms}^{-2}/\text{N}$ ]).



Obr.1 Sumační funkce FFP pro kolo bez tlumiče

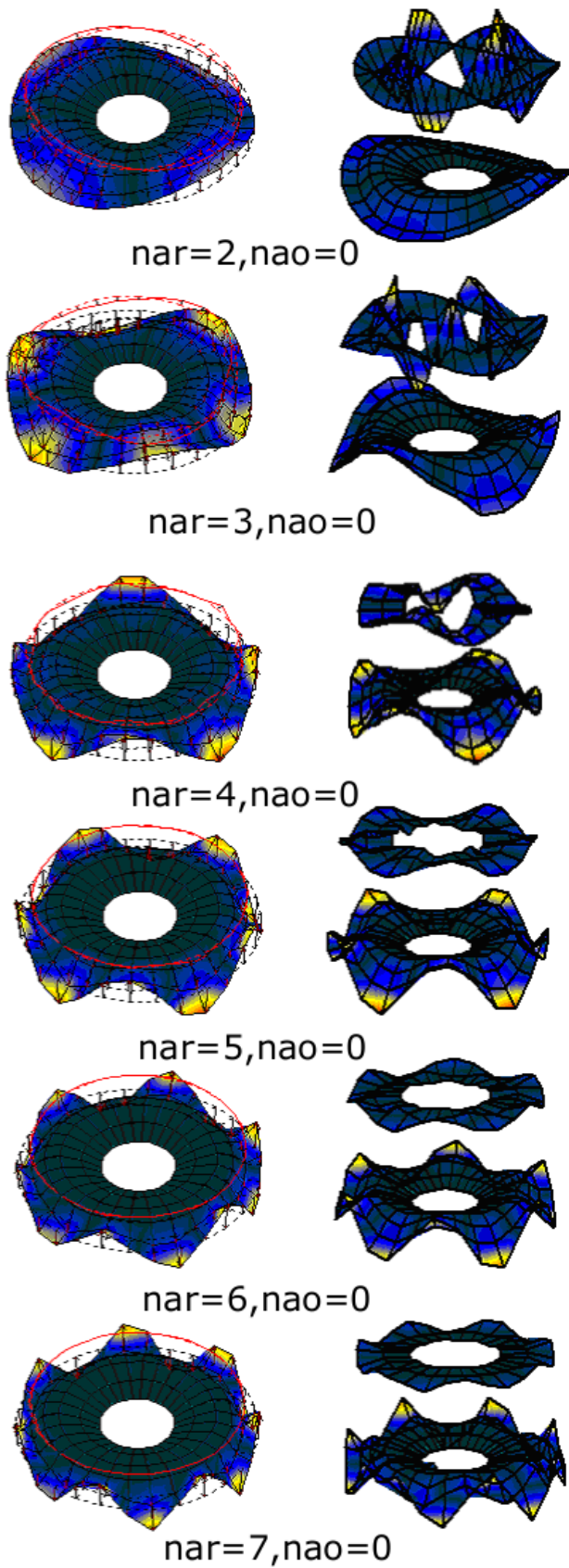


Obr.2 Sumační funkce FFP pro kolo s tlumičem

Identifikované vlastní čísla modální analýzy s vybranými dominantními rezonancemi jsou pro obě varianty kola shrnuty v Tab.1. V těchto tabulkách jsou uvedeny poměrné útlumy v procentech, vlastní frekvence v Hz a klasifikace příslušných vlastních tvarů (módů). Číslo tvaru odpovídá pořadí tohoto tvaru v celkovém počtu identifikovaných módů experimentální analýzy, jež jsou podrobně popsány v Pešek&Veselý (2006).

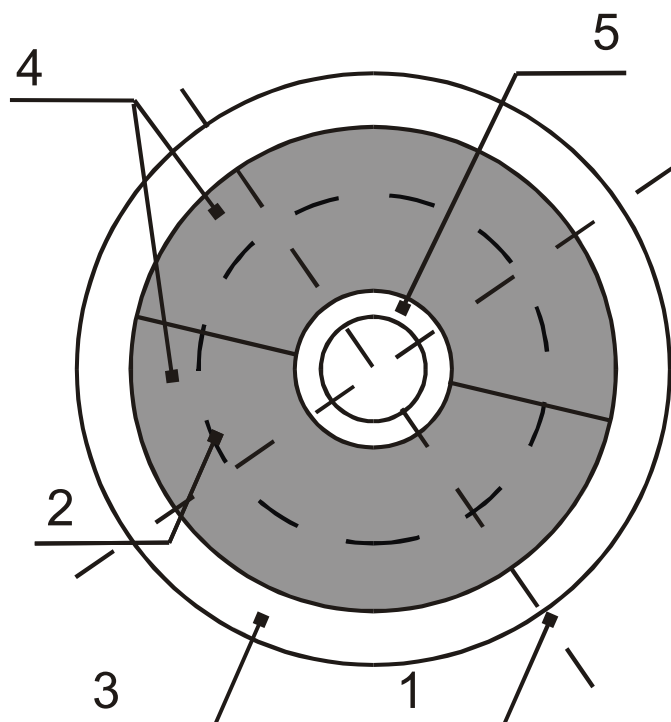
Tab.1 Identifikované tvary s dominantním kmitáním disku, obruče a celého kola pro případ kola bez a s tlumícími deskami

| Kolo bez tlumící desky |                   |               |                | Kolo s dvěma tlumícími deskami |                   |               |                | Popis vlastního tvaru |
|------------------------|-------------------|---------------|----------------|--------------------------------|-------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Tvar č.                | Vlast.frekv. [Hz] | Pom.útlum [%] | Rezon.fr. [Hz] | Tvar č.                        | Vlast.frekv. [Hz] | Pom.útlum [%] | Rezon.fr. [Hz] |                       |
| 7                      | 487               | 0.011         | 488            | 7                              | 488               | 0.23          | 483            | nar=2,nao=0           |
| 10                     | 1290              | 0.011         | 1283           | 10                             | 1290              | 0.12          | 1283           | nar=3,nao=0           |
| 18                     | 2300              | 0.007         | 2310           | 17                             | 2300              | 0.08          | 2330           | nar=4,nao=0           |
| 23                     | 3410              | 0.01          | 3419           | 20                             | 3410              | 0.06          | 3460           | nar=5,nao=0           |
| 33                     | 4570              | 0.006         | 4548           | 24                             | 4560              | 0.05          | 4548           | nar=6,nao=0           |
| 43                     | 5750              | 0.005         | 5739           | 28                             | 5740              | 0.05          | 5740           | nar=7,nao=0           |



Obr.3 Vlastní tvary identifikovaných vlastních čísel s nulovým počtem uzlových kružnic (, kolo s tlumičem – levý sloupec, kolo bez tlumiče – pravý sloupec)

Sumační funkce frekvenčního přenosu je vypočtena jako suma frekvenčních přenosů všech konfigurací budič- snímač (v našem případě 270 konfigurací).



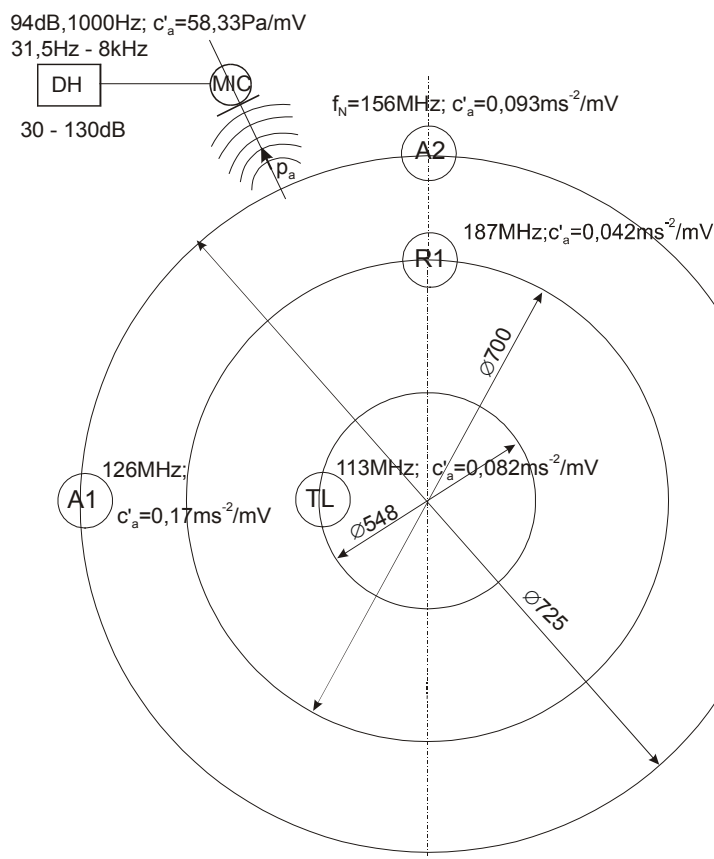
Obr. 4 Znáznornění uzlových čar (čárkovaná čára) pro vybraný vlatní tvar kmitání kola: 1 - uzlové čáry radiální, 2 - uzlová obvodová kružnice, 3 - věnec, 4 – půlená tlumící deska, 5 – náboj.

Vlastní tvary identifikovaných vlastních čísel z Tab.1 pro obě varianty kola jsou uvedeny na obr. 3. Pro kolo s tlumícími deskami je pro lepší přehlednost rovina desky tlumiče posunuta do vzdálenější roviny rovnoběžné s rovinou kola. Radiální tvar kmitání po obvodě věnec u kola bez tlumiče je vykreslen červenou čarou opět v odsazené rovině rovnoběžné s rovinou kola. Při klasifikaci módů jsou použity následující zkratky: nar – počet radiálních uzlových čar desky kola, nao – počet obvodových uzlových čar desky kola.

Na obr. 4 jsou znázorněny radiální a obvodové uzlové čáry pro případ dvou radiálních a jedné uzlové obvodové kružnice. Protože radiální uzlová čára prochází celým kolem, tj. deskou kola i věncem, byl by tento tvar kmitání označen jako nar=2, nao=1.

## 2. Měření provozního kmitání železničních kol

Měření kmitání a hluku železničního kola bez a s přidávným tlumičem probíhalo v provozních podmínkách za jízdy soupravy vagónů Metra (výroba SSSR s podvozkem č.a2802) na zkušební trati DEPA Zličín a na trati METRA linky B. Měření vibrací bylo provedeno na kole ( $\varnothing 785\text{mm}$ ) dvojkolí vyrobeného firmou BONATRANS a.s., Bohumín. Pro měření vibrací kola byly rozmístěny na kole akcelerometry (viz obr.5). Pro měření zrychlení v axiálním směru byly připevněny na věnec kola dva kapacitní zpětnovazební akcelerometry A1, A2 a jeden piezoelektrický akcelerometr R1 pro měření zrychlení v radiálním směru. Na desce tlumiče byl uchycen další kapacitní zpětnovazební akcelerometr TL. Měření probíhala ve frekvenčním rozsahu do cca 6kHz. Rozsah měření akcelerometrů byl 18g. Na věnci kola byla uchycena fázová značka, kterou se měřila okamžitá rychlost kola a referenční místo na obvodě. Na věnci kola byly dále bodově přivařené miniaturní frekvenčně modulované vysílače s napájecími bateriemi pro vysokofrekvenční přenos signálu z unášených akcelerometrů kola na přijímací anténu připevněnou na krytu ložiska nápravy. Odtud se signál vedl koaxiálním kabelem do vozu, kde byly umístěny přijímače a číslicové měřicí přístroje pro měření a záznam snímaného zrychlení kola. Současně s měřením vibrací se ještě snímal měřícím mikrofonom MIC akustický tlak. Mikrofon byl umístěn ve



Obr. 5 Schéma rozmístění snímačů a jejich parametrů na železničním kole

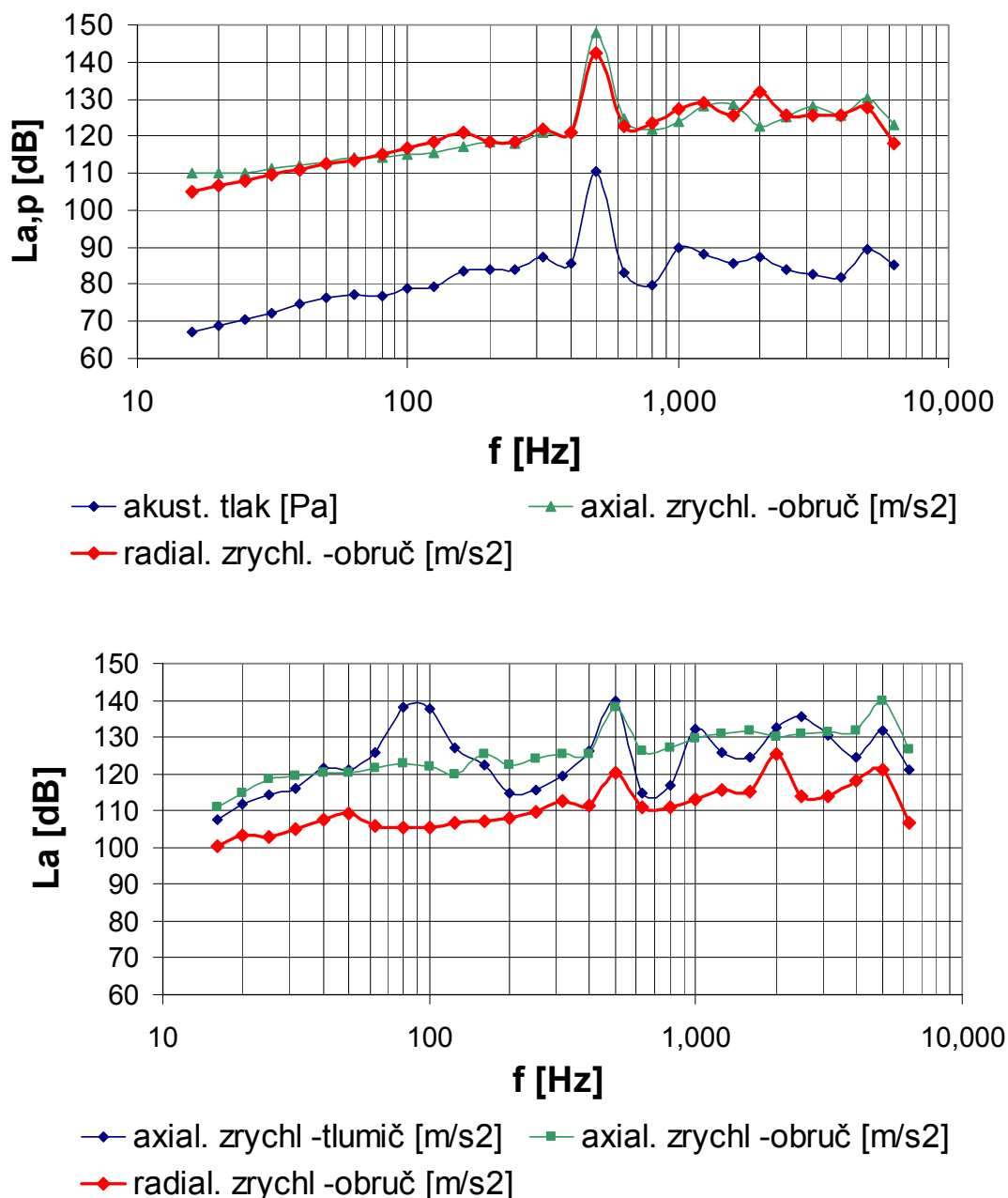
kalibrátorem B&K4231. Výpočet akustického tlaku a hodnot zrychlení ve skutečném měřítku z demodulovaného výstupního napětí přijímače  $U_p$  byl proveden součinem kalibrační citlivosti  $c_a$  a  $U_p$ .

Při vlastním měření vyjel vůz s nainstalovanými snímači a měřicím zařízením v soupravě s dalšími čtyřmi vozy nejprve na zkušební trať, a pak na trať METRA. Podle programu zkoušky se uskutečnila jízda soupravy na rovném úseku a v oblouku při rychlostech 40 a 60km/h a při průjezdu a zastavení vlaku ve stanici. V první etapě proběhlo měření kola s tlumičem (měření signálů A1,A2,R1,TL,FZ) a v druhé po demontáži tlumičů kola bez tlumiče (měření signálů A1,A2,R1,MIC,FZ). Během jednotlivých jízd byla data snímána číslicovým osciloskopem YOKOGAWA DL750 s vzorkovací frekvencí 20kHz výstupní napětí ze všech snímačů. Měření akustiky kol s tlumičem i bez tlumiče bylo paralelně zajišťováno pracovníky ÚŽKS VUT Brno.

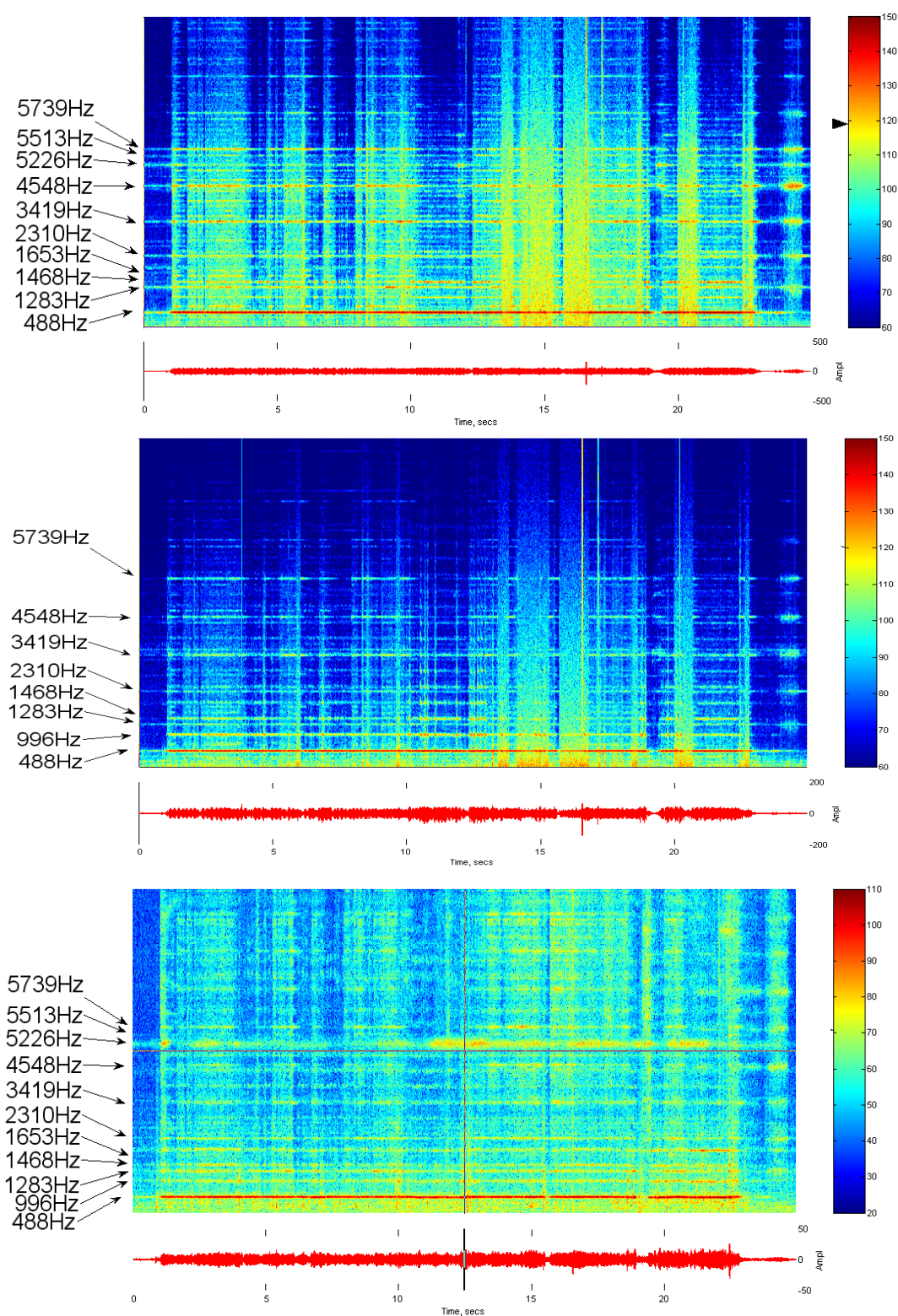
Záznamy signálů z měřeného kola byly vyhodnocovány několika způsoby: a) vyhodnocení amplitudo-frekvenčních spekter z vybraných kratších časových úseků metodou FFT, b) vyhodnocení spektrogramů, tj. amplitudo-časofrekvenčních závislostí signálů, pomocí STFT („short FFT“) delších časových úseků, c) třetinooktávová spektra hladin spektrální výkonnové hustoty akustického tlaku  $L_p$  resp. zrychlení  $L_a$ . Při průjezdu obloukem, kdy dochází k přechodovým jevům, se pro posouzení dynamického chování kola nejlépe osvědčily

vzdálenosti 235mm od věnce kola poblíž ložiska nápravy. Dále se měřila poloha natočení a rychlost kola pomocí fázové značky FZ umístěné na druhém kole měřeného dvojkolí. V laboratoři ÚT AV ČR byly kalibrovány akcelerometry ve spojení s příslušným miniaturním frekvenčně modulovaným vysílačem z nosnou frekvencí  $f_N$  a k tomu naladěným přijímačem s frekvenční demodulací přijímaného signálu o výstupním napětím  $U_p$ . Pro přesné nastavení hodnoty zrychlení měřeného akcelerometru bylo použito elektrodynamického vibrátoru s přesným piezo-elektrickým akcelerometrem B&K4507 s vestavěnou elektronikou s výstupním napětím  $1,004\text{mV/ms}^{-2}$  ve frekvenčním rozsahu 0.1Hz až 6kHz. Zvukoměr s mikrofonom byl kalibrován akustickým

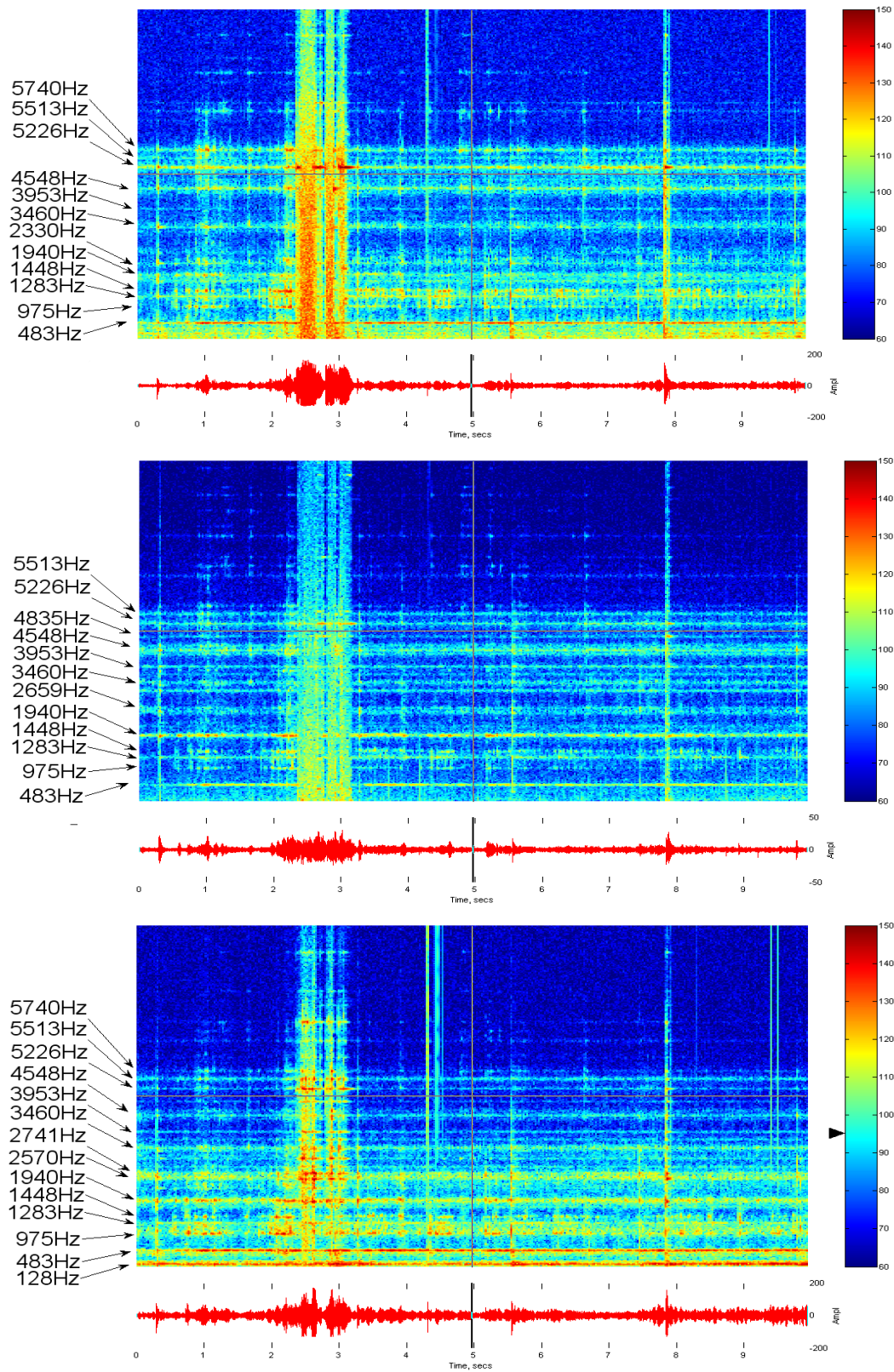
spektrogramy a pro kvantitativní posouzení změn kola s a bez tlumiče výkonová spektra. Na následujících obrázcích 7 a 8 jsou uvedeny typické výsledky průjezdů obloukem s výskytem „kvílivého“ hluku obou typů kol. U kola bez tlumiče jde o záznam ZLBE0008 (27.8.05, 15:00 – průjezd obloukem, rychlost 4,4 m/s) a u kola s tlumičem o záznam ZLIC0008 (21.8.05, 12:38 – průjezd obloukem, rychlost 5,9 m/s). Vždy pod každým spektrogramem je časový průběh zpracovávaného signálu ve skutečném měřítku, tj.  $\text{ms}^{-2}$  u zrychlení a Pa u akustického tlaku. Na obr. 6 jsou z těchto záznamů vyhodnocena třetinooktávová spektra.



Obr.6 Třetinooktávová analýza vibrací a hluku při průjezdu obloukem (kolo bez tlumiče – nahoře, kolo s tlumičem –dole)



Obr.7 Spektrogramy vibrací a hluku pro kolo bez tlumičů (A1-nahoře, R1-uprostřed, MIC-dole)



Obr.8 Spektrogramy vibrací a hluku pro kolo s tlumičem (A1-nahoře, R1-uprostřed, TL-dole)

### 3. Posouzení vyhodnocených výsledků

Z provedené analýzy výsledků měření kola bez a s tlumičem při jízdě obloukem vychází některé poznatky:

- Ve spektrogramech jsou jednotlivým rezonancím kmitání kola přiřazeny hodnoty odpovídajících frekvencí. Tyto frekvence velmi dobře až na malé výjimky odpovídají identifikovaným vlastním frekvencím modální analýzy. V tab. 1 jsou uvedeny vlastní tvary s nulovým počtem uzlových kružnic ( $n_{ao}=0$ ), které jsou charakteristické pro pískání kol. Výjimky dalších neidentifikovaných frekvencí mohou vznikat buď výraznějším rozštěpením rezonancí, které se při modální analýze nezatíženého kola neobjevují (interakce s kolejnicí), nebo vyššími harmonickými složkami některých rezonancí v důsledku nelineárního samobuzeného kmitání při režimu pískání (případ suchého tření).
- Fakt, že identifikované vlastní frekvence ( $n_{ao}=0$ ) kola dvojkolí v klidovém a nezatíženém stavu se prakticky neliší od rezonančních frekvencí kola dvojkolí v provozu lze vysvětlit vlastním tvarem těchto módů a jejich rozštěpením díky interakci s kolejnicí, kdy místem kontaktu kolo-kolejnice prochází buď uzlová radiální čára (uzel) jednoho rozštěpeného tvaru nebo kmitna druhého natočeného módu přičemž při odvalování se módy nenatáčejí spolu s rotací kola, ale zůstávají prostorově uzamčeny (Giannini&Massi, 2004).
- Vlivem tlumičů dochází k zvýšení poměrného útlumu vlastních tvarů kola (Tab.1) a k rozštěpení rezonancí, jež vede k výraznému snížení amplitud FFP (obr.3). Tento efekt je také pozorován u provozního kmitání, kdy z výkonových spekter je zřejmé snížení hodnot u axiálního kmitání o cca 8dB a u radiálního o cca 20dB.
- Na rozdíl od kola bez tlumiče se však u kola s tlumičem objevuje kmitání vlastního tlumiče s maximálními úrovněmi cca 140dB v pásmech 100Hz a 500Hz, jež přispívá k vyzařovanému hluku tlumeného kola. V oblasti 100Hz jde o vlastní kmitání desky tlumiče.
- Vysoké hladiny pásma 500Hz u obou typů kol jsou způsobeny vlastní frekvencí kola s tvarem  $n_{ar}=2$  a  $n_{ao}=0$ . Tato frekvence hraje dominantní roli i na hluk šířený do okolí.
- Spektrogramy dále ukazují na časovou proměnnost frekvenčního spektra vibrací i hluku při průjezdu obloukem. U kola bez tlumiče je pískání kol pozorováno prakticky nepřetržitě během celého průjezdu obloukem u kola s tlumičem se pískání objevuje jen v některých místech oblouku, jak je i patrné z časových záznamů pod jednotlivými spektrogramy.
- Z modální analýzy kola bez tlumiče je vidět, že radiální kmity klesají s řádem  $n_{ar}$  vlastního tvaru v důsledku slabší vazby mezi axiálním a radiálním kmitáním. To je patrné i z provozního kmitání.
- Spektrogramy i třetinooktávová spektra akustického tlaku a zrychlení ukazují přenos vibrací kola do akustického prostředí. Z posouzení jednotlivých složek frekvencí je možné posoudit vibro-akustickou vazbu.

#### 4. Závěr

V příspěvku je popsána metodika testování a vyhodnocení modální analýzy a provozního kmitání železničních kol bez akustické tlumicí desky a s půlenou tlumicí deskou. Na základě modální a spektrální analýzy byly identifikovány módy kmitání, které nejvíce přispívají k vyzařování hluku do okolí při průjezdu obloukem a vzniku kvílivého hluku.

Ze současných měření vibrací a akustického tlaku v okolí běžícího kola byla zkoumána strukturálně akustická vazba. Srovnávací zkoušky kola s tlumičem a bez tlumiče ukázaly na dynamické chování těchto typů kol a příspěvek navržených tlumičů k potlačení vibrací a hluku. Výsledky budou využity pro další vývoj přídatných tlumičů v BONATRANS a.s.

#### 5. Poděkování

Příspěvek byl vypracován v rámci řešení grantového projektu GA ČR č.101/05/2669 „Dynamika a spolehlivost vibrotlumících členů z termo-visko-elastických materiálů“.

#### 6. Literatura

- Pešek L., Veselý, J. (2006) Stanovení vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání a ztrátového činitele pro monoblokové železniční kolo, *Výzkumná zpráva Z1379/06*, ÚT AV ČR.
- Tuchinda, A., Hoffmann, N. P., Ewins, D. J. and Keiper, W. (2002) Effect of Pin Finite Width on Instability of Pin-On-Disc Systems., *Proceedings of the International Modal Analysis Conference –IMAC*, Vol. 1, pp. 552–557.
- Allgaier, R., Gaul, L., Keiper, W., Willnery, K., Hoffmann, N. (2002) A study on brake squeal using a beam on disc, *Proceedings of the International Modal Analysis Conference – IMAC*, Vol. 1, pp. 528–534.
- Giannini, O.,Massi, O. (2004) An experimental study on the brake squeal noise, *Proceedings of the International Modal Analysis Conference – IMAC*, CD-ROM, pp. 1–16.