

# AKUSTICKÉ LISTY

České akustické společnosti  
www.czakustika.cz

ročník 11, číslo 2

červen 2005

## Obsah

|                                                                                                                   |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 70. akustický seminář                                                                                             | 3 |
| 71. akustický seminář                                                                                             | 3 |
| 16 <sup>th</sup> Electronic Speech Signal Processing and 15 <sup>th</sup> Czech-German Workshop Speech Processing | 3 |
| Hluk automobilu – pneumatiky<br>Vehicle Noise – Tyres<br><i>Lukáš Pelant</i>                                      | 8 |

ČESKÁ AKUSTICKÁ SPOLEČNOST



## 70. akustický seminář

Ve dnech 16. až 19. května 2005 proběhl v Opočně 70. akustický seminář. Seminář se zabýval otázkami fyzikální akustiky, metodami měření a hodnocení hluku a vibrací, snižováním hluku v různých oblastech života. Zabýval se i otázkami akreditace akustických laboratoří a novinkami v normalizaci, byly zde také prezentovány výrobky a softwarové produkty pro akustiku. Velmi zajímavý blok se týkal hudební akustiky a s ní souvisejících témat. Semináře se zúčastnilo 69 členů i nečlenů České akustické společnosti, bylo předneseno celkem 33 příspěvků, z nichž 23 je publikováno ve sborníku semináře, který bude k dispozici také v elektronické podobě.

Organizátoři semináře také děkují sponzorům, kteří svými příspěvky umožnili bezproblémový průběh semináře.

Ondřej Jiříček

## 71. akustický seminář

připravuje Česká akustická společnost – OS „Stavební a prostorová akustika“ spolu s OS „Hluk a vibrace“.

Seminář se bude konat od 11. do 13. října 2005 v hotelu Horník ve Třech Studních na Vysočině. Hlavními tématy semináře jsou stavební, prostorová a urbanistická akustika. Žádány jsou rovněž příspěvky z dalších oblastí akustiky. Část semináře bude také věnována problematice měření hluku a problematice MPZ zkušebních laboratoří. Srdečně jsou zváni všichni členové České a Slovenské akustické společnosti a další zájemci. Na semináři jsou vítáni i zástupci firem, které dodávají měřicí techniku nebo vyrábějí či dodávají výrobky a konstrukce pro stavební akustiku a snižování hluku. V průběhu semináře se uskuteční společná veřejná schůze odborných skupin ČsAS.

Nabídky příspěvků, text referátu k otištění ve sborníku, přihlášky k účasti a ubytování zasílejte v termínech a dle pokynů uvedených na přihlášce. Průběžné informace budou uveřejňovány na webové stránce ČsAS [www.czakustika.cz](http://www.czakustika.cz).

Anna Ryndová

## 16<sup>th</sup> Electronic Speech Signal Processing and 15<sup>th</sup> Czech-German Workshop Speech Processing

V minulém čísle Akustických listů jsme Vás informovali o mezinárodní konferenci, která se bude konat ve dnech 26. až 28. září 2005 v prostorách Hudební fakulty Akademie múšických umění v Praze. Na následujících stránkách je uveden předběžný program konference včetně sekce posterů.

Přesné informace o případné možnosti přihlášení naleznete na oficiálních webových stránkách konference <http://www.ias.et.tu-dresden.de/essp2005>, odkaz je i na webu ČsAS.

Ing. Robert Vích, DrSc.  
General Chairman

Electronic Speech Signal Processing – ESSP 2005 & Speech Processing, Preliminary Program, MONDAY, 26. 9. 2005

|                                                                                                                                     | ACTIVITY                                                   | NAME                                                                                                           | TITLE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10:00                                                                                                                               | REGISTRATION<br>ITG MEETING                                |                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 12:00–16:20<br>12:00–12:20                                                                                                          | POSTER INSTALLATION<br>OPENING                             |                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                                                                                                                     | <b>PHONETICS &amp; PROSODY</b>                             |                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 12:20–13:00<br>13:00–13:20<br>13:20–13:40<br>13:40–14:00<br>14:00–14:20<br>14:20–14:40<br>14:40–15:00<br>15:00–15:20<br>15:20–15:40 | INVITED PAPER<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>BREAK | Keller E.<br>Abresch J.<br>Dohalská M.<br>Vlčková J.<br><br>Koloska U.<br>Dong B.<br>Eslami M.<br>Skarnitzl R. | A Phonetician View of Signal Generation for Speech Synthesis<br>The Pronunciation of Anglicisms and English Proper Names in German: A Corpus Study<br>Non-standard Rhythmic and Melodic Grouping of Utterances and Their Perception<br>Prosodic Changes in Emotional Speech<br><br>An E-learning Expert System that Detects Pronunciation Errors for Non-Native Speaker<br>Computer-Assisted Mandarin Chinese Learning Based on Tone<br>Syntactic Analysis and Prosodic Formalization in GUYA, a TTS System for Persian<br>Asymmetry of Czech Vowel-Nasal and Nasal-Vowel Transitions in the Spectrogram and<br>in Separated Oral-Nasal Recordings |
| 15:40–16:00<br>16:00–16:20                                                                                                          |                                                            | Horák P.<br>Čermák J.                                                                                          | Using Neural Networks to Model Duration in Czech Text-to-Speech Synthesis<br>Using Fuzzy System for Prosody Modelling                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 16:20–18:00<br>18:00–20:00                                                                                                          | POSTER INTRODUCTION<br><br>WELCOME PARTY                   |                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

## Electronic Speech Signal Processing – ESSP 2005 &amp; Speech Processing, Preliminary Program, TUESDAY, 27. 9. 2005

|             | ACTIVITY                        | NAME                | TITLE                                                                                                                     |
|-------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8:20–9:00   | INVITED PAPER<br>DIALOGUE       | Štěpánek J.         | Psychoacoustic Experiment in the Research of Musical Sound Timbre                                                         |
| 9:00–9:20   | BREAK<br><br>SPEECH ENHANCEMENT | Fellbaum K.         | Electronic Speech Processing and Ambient Intelligence – A Look into the Future                                            |
| 9:20–9:40   |                                 | Berton A.           | How to Speed up Voice-Activated Destination Entry                                                                         |
| 9:40–10:00  |                                 | Burghardt F. et al. | An Emotion-Aware Voice Portal                                                                                             |
| 10:00–10:20 |                                 | Matoušek V.         | Formal Model of a Dialogue                                                                                                |
| 10:20–10:40 |                                 |                     |                                                                                                                           |
| 10:40–11:00 | LUNCH BREAK                     | Janardhanan D.      | Wideband Speech Enhancement Using a Modified Noise Estimation                                                             |
| 11:00–11:20 |                                 | Setiawan P.         | Least-Square Weighting Rule Formulation in the Frequency Domain                                                           |
| 11:20–11:40 |                                 | Petrick R.          | Comparison of a Single Channel and a Multi Channel Noise Reduction in the Acoustic front of an Embedded Speech Recognizer |
| 11:40–12:00 |                                 | Sigmund M.          | Acoustic Authenticity of Old Optical Sound Tracks                                                                         |
| 12:00       |                                 |                     |                                                                                                                           |
| 14:00–14:20 | SPEAKER & SPEECH RECOGNITION    | Koreman J.          | Discriminative Features by MLP Preprocessing for Robust Speaker Recognition in Noise                                      |
| 14:20–14:40 |                                 | Davarpanah H.       | Speaker Identification Using Orthogonal and Discriminative Features                                                       |
| 14:40–15:00 |                                 | Estelmann J.        | Phone and Word Based Confidence Scores for Command and Control Applications.                                              |
| 15:00–15:20 |                                 | Helbig J.           | Speech Controlled Damage Monitoring in Automobile Logistics                                                               |
| 15:20–15:40 |                                 | Kroschel K.         | Construction of a Personalized Talking Head from Two Images                                                               |
| 15:40–16:00 |                                 | Pritsch M.          | Visual Speech Training System for Deaf Persons                                                                            |
| 16:00–16:20 |                                 | Chaloupka J.        | Czech Collection of the Visemes for the Automatic Audio-Visual Speech Recognition                                         |
| 16:20–16:40 |                                 |                     |                                                                                                                           |
| 16:40–17:00 |                                 | Nejedlová D.        | Lexical, Phonetic, and Grammatical Aspects of Very-Large-Vocabulary Continuous Speech Recognition of Czech Language       |
| 17:00–17:20 |                                 | Holada M.           | The PDF Based Compression Methods for Features Vectors in DSR Systems                                                     |
| 17:20–17:40 | BREAK                           | Nouza J.            | Towards Automatic Transcription of Parliament Speech                                                                      |
| 17:40–18:00 |                                 | Möller S.           | Towards Developing Speech-Quality Recognizers: Some Basic Considerations on the Structure of Quality Prediction Models    |
| 18:00–19:00 | POSTER SESSION                  |                     |                                                                                                                           |
| 19:00–20:00 | CONCERT                         |                     |                                                                                                                           |
| 20:00–23:00 | BANQUET                         |                     |                                                                                                                           |

## Electronic Speech Signal Processing – ESSP 2005 &amp; Speech Processing, Preliminary Program, WEDNESDAY, 28. 9. 2005

|             | ACTIVITY                | NAME                         | TITLE                                                                  |
|-------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|             | <b>SPEECH SYNTHESIS</b> |                              |                                                                        |
| 8:20–8:40   | BREAK                   | Duběda T., Vích R., Horák P. | History of Speech Synthesis in the Czech Lands                         |
| 8:40–9:00   |                         | Jekosch U.                   | Listener Expectations and Synthetic Speech: A Reflection on Quality    |
| 9:00–9:20   |                         | Wittenberg S., Jokisch O.    | The Ergonomic Design of Web Portals for Testing Speech Synthesis       |
| 9:20–9:40   |                         | Werner S.                    | Pronunciation Variation Modelling for Spontaneous Speech Synthesis     |
| 9:40–10:00  |                         | Schnell K.                   | Speech Generation by Adaptive Concatenation of Parameterized Diphones  |
| 10:00–10:20 |                         |                              |                                                                        |
| 10:20–10:40 |                         | Rohde H.                     | An HNM Synthesizer for BOSS                                            |
| 10:40–11:00 |                         | Přibil J.                    | Czech TTS Engine for Braille Pen Device Based on Pocket PC Platform    |
| 11:00–11:20 |                         | Weiss CH.                    | Low-Footprint HMM-Based Speech Synthesis Applied to German             |
| 11:20–11:40 |                         | Krnasch M., Vích R.          | Experiments in Speech Signal Coding Based on Karhunen-Loeve Transform  |
| 11:40–12:00 |                         | Vondra M.                    | Sound Dependent Spectral Warping in Voice Identity Conversion          |
| 12:00–12:20 |                         | Zemirli Z.                   | ARAB_TAG: A Morphosyntactic Tagger for an Arabic Text to Speech System |
| 12:20–12:40 | CLOSING                 |                              |                                                                        |
| 13:00       | LUNCH                   |                              |                                                                        |
| 14:00       | EXCURSION               | Strahov Monastery            |                                                                        |

## Electronic Speech Signal Processing – ESSP 2005 &amp; Speech Processing, Preliminary Program, POSTER SESSION

|               |                                                                                                   |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bořil H.      | Analysis of Lombard Effect Appearance in Several Czech Databases                                  |
| Brada M.      | GUI to Czech Pronunciation Lexicon for Speech Recognition Purposes                                |
| Drábková J.   | Punctuation Effect on Classed-Based Language Model for Czech Language                             |
| Hain H.       | Classification and Pronunciation of Numbers for a TTS System                                      |
| Hanzlíček Z.  | On Modelling Syllables in Text-to-Speech Synthesis                                                |
| Hoffmann R.   | Speech Synthesis for a German Pronunciation Dictionary – Phonetic Evaluation                      |
| Holada M.     | Distributed Speech Recognition System Using Parallel Processing                                   |
| Chaloupka Z.  | Analysis of Mispronunciation Using Time Alignment of Phonemes                                     |
| Ketzmerick B. | Comparative Investigations of Voice Imitations                                                    |
| Kolorenc J.   | Automatic Punctuation of Automatically Recognized Speech                                          |
| Kuča M.       | Experiments with Packet Loss Concealment in VoIP                                                  |
| Mašek J.      | An Acoustic Analysis of Lombard Speech for the Automatic Speech Recognition                       |
| Pollák P.     | Influence of HMM's Parameters on the Accuracy of Phoneme Labelling                                |
| Rajmic P.     | Method for Wavelet-Type Signal Processing in Real Time                                            |
| Smékal Z.     | Semi-Symbolic CAD Discrete System Analysis                                                        |
| Štemberk P.   | Increasing the Recognition Speed by Using FSM                                                     |
| Švec J.       | Automatic Punctuation from Speech Using Nearest-Neighbor Prosodic Model                           |
| Sysel P.      | Voice Activity Detection Based on Statistic Models                                                |
| Tatarinov J.  | HMM Based VAD Using Token Passing Algorithm and Generalized Speech and Silence Models             |
| Tučková J.    | Contribution to Children Speech Analysis                                                          |
| Verner B.     | Mobile Notetaker for the Blind with Czech Speech Output                                           |
| Weiss B.      | Variation of Local Speaking Rate in Spontaneously Produced Vowels                                 |
| Witschel P.   | Language Identification from Short Text Messages with Application to SMS Reading on Mobile Phones |
| Wolff M.      | Meta-Classification for a Language Identification Task                                            |
| Zochová P.    | A Metric-Based Approach to Speaker Change Detection                                               |

# Hluk automobilu – pneumatiky

Lukáš Pelant

ČVUT – FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6

email: pelanl1@fel.cvut.cz

Acoustics of tyres is a dynamically evolving field, where methodology continues to evolve. There is a great number of methods, which are best suited for various areas of interest. But even for one purpose there are many procedures, not to mention possible analyses, and experts differ in their preferences. Measurement options are many: exterior or inner noise, on cobbles, asphalt or a dynamometer. Measured data can be analysed using FFT, CPB or order analysis. Results of these analyses can be presented in 3D or, after necessary data reduction (either averaging or taking the maximum of the whole measurement), 2D diagrams. Even the best possible axes span is not set. Furthermore, there are other, supplementary measurements, intended to determine an exact source of given problem, like modal analysis or ODS analysis. The aim of this article is to suggest the best suited measurement methods and analyses for the needs of noise and vibration measurements of tyres.

## 1. Hluk osobních automobilů

V dnešní době a při stávající konkurenci je nezbytně nutné snižovat hluk v interiéru vozu. Na tomto problému se pracuje po celou dobu vývoje vozu. Ve fázi návrhů přicházejí ke slovu stále se vyvíjející simulační metody, jejichž význam stoupá spolu s výkonem počítačů, následně se uplatňuje klasické měření, které se neustále zkvalitňuje díky pokroku jak v oblasti měřicích přístrojů, tak i měřicích postupů a metod vyhodnocování.

Hluk v automobilu pochází především z několika hlavních zdrojů. Každý z nich se projevuje při jiných provozních podmínkách. Motor a pomocné agregáty jsou jedny z nejpodstatnějších zdrojů. Hluk zde vzniká v důsledku proměnných sil a rázů v motoru, které působí na povrch motoru a odtud vyzařují, nebo se přenáší přes motorová ložiska ve formě mechanických kmitů. Hluk motoru se skládá z hluků mechanických a hluků souvisejících se spalováním a výměnou náplně.

Úroveň hluku moderního alternátoru může být asi od 3000 ot./min. řádově stejná jako ostatní hluk zážehového motoru. Příčinou hluků, které silně závisí na zatížení, jsou proměnné elektromagnetické síly ve vzduchové mezeře, které způsobují zvuk šířící se v pevných materiálech rotoru a statoru. Zvuk je pak vyzařován do vzduchu. Další hluk způsobuje větrák alternátoru, jeho frekvence je úměrná rychlosti větráku a počtu lopatek.

Ventilátor slouží ke chlazení motoru a hlučí zejména u výkonných motorů. Vytváří hluk jednak lopatkami větráku, jednak průchodem vzduchu chladičem.

Při pohybu auta vzduchem dochází v místech ostrých změn tvaru karoserie (na výstupcích, ve spárách apod.) k odtržení proudu vzduchu, čímž vznikají víry. To způsobuje hvízdání. Pro míru vlivu na vnitřní hluk v automobilu je důležitá schopnost akustické izolace skel, uspořádání a kvalita akustické izolace těsnění oken a dveří (vícenásobná těsnění) a rovněž tvoření vírů nad střechou a uspořádání nástaveb. Hluk závisí vzhledem k mechanismu svého vzniku silně na rychlosti.

Snižování hluku automobilu v minulosti znamenalo především omezení hluku od motoru. Tato snaha byla do značné míry úspěšná. Důsledkem je, že zvláště při dojezdech na nižších rychlostech, řádově kolem 50 km/h, ale často i při jízdě ustálenou rychlostí, jsou u moderních automobilů dominantní odvalovací hluky pneumatik. Další snižování hluku celého automobilu je tedy nemyslitelné bez snížení hluku pneumatik.

## 2. Hluk pneumatik

Princip vzniku odvalovacích hluků není ještě plně znám. Existují o tom však poměrně spolehlivé teorie.

Je třeba odlišovat hluk vnitřní a vnější. Oba jsou tvořeny odlišnými způsoby a projevují se u nich jiné vlastnosti pneumatiky i automobilu jako celku. Kromě toho se u vnitřního hluku uplatní i přenosové cesty v karoserii a interference mezi hluky jednotlivých pneumatik (vnitřní hluk se měří na konkrétních místech, kde se interference projeví, zatímco u vnějšího hluku nás zajímá hlavně maximum) – oba tyto prvky působí jako filtry.

Podle mechanismu vzniku se hluk pneumatiky dále skládá z otáčkově nezávislých složek, rezonancí a ze složek na otáčkách závislých. Tyto tzv. harmonické složky se objevují na násobcích frekvencí odpovídajících otáčkám kola. Nalezení harmonických složek ve spektru hluku nabraného při rozjezdu nebo dojezdu je úkolem tzv. harmonické analýzy. Obecně zde platí následující jednoduché vztahy

$$v = o \cdot \text{cps} \text{ [m/s]}, \quad (1)$$

$$v \approx \text{cps} \cdot 2 \cdot 3,6 \text{ [km/h]} = 7,2 \cdot \text{cps} \text{ [km/h]},$$

$$\text{ORD} = \frac{60f}{\text{RPM}} = \frac{f}{\text{cps}} = \frac{f \cdot o}{v \text{ [m/s]}} = \frac{f \cdot o \cdot 3,6}{v \text{ [km/h]}}, \quad (2)$$

kde cps jsou otáčky kola za vteřinu,  $o$  je dynamický obvod kola (konkrétně u Octavie cca 2 m), ORD je pořadí harmonické,  $v$  je rychlost,  $f$  je frekvence a RPM jsou otáčky za minutu.

Hlavní příčinou vnitřního hluku od pneumatik jsou vibrace. Vybuzeň jsou nerovnostmi na vozovce, nehomogenitami a defekty v pneumatice a její nerovnoměrností. Na nízkých frekvencích dochází k vybuzení prvních obvodových módů a za odezvu pneumatiky zodpovídá především napětí způsobené nahuštěním. Asi na 230 Hz se objevuje první rezonance vzduchu v pneumatice. Ta je spolu s prvními obvodovými módy zodpovědná zvláště za vibrace na náboji kola a potažmo za vnitřní hluk. Je důležité, aby na této frekvenci nemělo rezonanci i auto (podvozek, závěsný aparát kola, vnitřní prostor karoserie, eventuálně auto jako celek), pak totiž dochází k velkému nárůstu hlučnosti, což znemožňuje daný typ pneumatiky použít. Na nízkých frekvencích se pneumatika chová spíše jako dvourozměrný disk, ale od 400 Hz se začínají šířit módy i v příčném směru. Na vyšších frekvencích upadá význam napětí nahuštěním a důležitější je ohybová tuhost struktury pneumatiky.

Odstranění ráfku se projeví jen na frekvencích pod 300 Hz a značně ovlivní frekvenční pozici nejdůležitějšího, 1. módu. Změna velikosti budící plochy přinese změny v odezvě na vyšších frekvencích.

Vibrace celé pneumatiky jsou nejvýraznější na boku a hraně pneumatiky, na protektoru se neprojevují tak výrazně. Jsou významné především pro vnitřní hluk a pro frekvence do 1 kHz. Vně pneumatika vyzařuje především mezi 300 Hz a 1 kHz, ale v porovnání s ostatními zdroji málo, protože bok pneumatiky je jako zářič neefektivní. Naproti tomu rezonance vzduchu v dutinách vzorku a další aerodynamické principy se uplatňují téměř výhradně pro hluk vnější a pro frekvence nad 1000 Hz. Karoserie totiž funguje jako dolní propust.

První z příčin vnějšího odvalovacího hluku je náráz elementů profilu na náběžné hraně pneumatiky na vozovku. Generovaný hluk má frekvence do 1 kHz. Kdyby byly příčné drážky ve stejné vzdálenosti, byl by tento hluk značně tonální s frekvencemi nad 1,2 kHz. Proto se vyrábějí pneumatiky s drážkami v nekonstantní vzdálenosti a na obou stranách pneumatiky různě.

Hluk od odskočení pneumatiky od vozovky, tzv. Stick-Snap, vzniká na výběhové hraně. Pneumatika odskočí od vozovky, čímž uvolní elastickou energii a vytváří tak hluk o frekvencích nad 1 kHz.

Periodické pohyby elementů profilu způsobují vibrace vzduchu v mezerách mezi nimi, tzv. Organ Pipe. Díky této vzduchové rezonanci vznikají vysoké tóny se spektrem závislým na tvaru a velikosti vzduchových skulin. Uplatňují se zde především podélné a zahnuté drážky.

$$f = \frac{v}{d}, \quad (3)$$

kde  $d$  [m] je vzdálenost vzduchových mezer ve vzorku pneumatiky a  $v$  [m/s] rychlost.

Při jízdě po silnici je vzduch na přední straně vytlačován z prostor mezi pneumatikou a vozovkou, na zadní straně pak zase nasáván (tzv. Air Pumping). Při rovnoměrném pumpování by se hluk objevovat neměl, nicméně

děje se tak, a přesný mechanismus je předmětem debat. Jedním z vysvětlení je vtlačování vzduchu do nerovností vozovky, který se po přejetí uvolní a při opětovném rozpínání generuje hluk. Dalším důvodem tohoto hluku by mohlo být prosté vytlačování vzduchu z nerovností mezi pneumatikou a vozovkou, tedy již na náběžné straně. Také je možné celý problém vysvětlit vtlačováním nerovností do gumy pneumatiky, která se následkem toho „přelévá“ a způsobuje hluk. Vytlačování vzduchu dále vybuze příčné drážky, které fungují jako Helmholtzovy rezonátory mezi 1 a 2,5 kHz. U hrubé vozovky není tento efekt významný, neboť vzduch může jednoduše uniknout mezi nerovnostmi.

Na styku pneumatiky s vozovkou dochází ke „klouzání“ elementů profilu. Poté dojde k „přilepení“ pneumatiky a jejímu odtržení (tzv. Stick-Snap). Na hrubé vozovce se tento princip uplatňuje méně.

Tvar, který tvoří pneumatika s vozovkou, má tu vlastnost, že zesiluje zvuky mezi 1 a 6 kHz tvořící se v jeho vrcholu (tzv. Horn Effect). Kromě toho dochází ještě k dalšímu zesílení blatníkem.

### 3. Měření hluku pneumatik

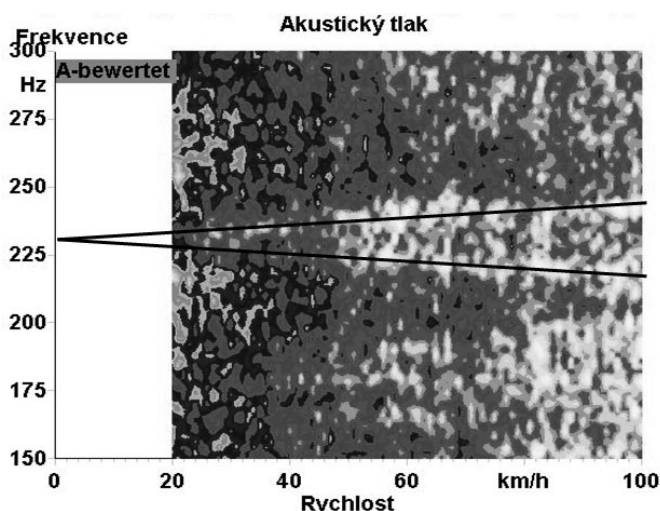
#### 3.1. Rezonance a módy

Rezonance jsou jedním z největších problémů u struktur a strojů. Když energie vstoupí ve formě vibrací do struktury a nemůže ji dost rychle opustit, cestuje v ní ve formě mechanické vlny. Tato se odráží a skládá a vytváří stojaté vlnění deformující strukturu, což se nazývá mód. Energie kmitání následně postupuje strukturou a je vyzařována ve formě hluku. Děje se tak však jen při rezonančních frekvencích, na ostatních struktura energii nepřijme, ale odráží.

V automobilu se klade největší důraz na vnitřní hluk. Právě ten totiž ovlivňuje komfort uživatele, potažmo marketingovou úspěšnost vozu. Vnitřní hluk od pneumatik je způsoben především vibracemi, které jsou na vlastních frekvencích pneumatiky zesíleny a následně postupují strukturou do vnitřku vozu. Je tedy nutné tyto rezonanční frekvence znát. Existuje několik možností, jak je zjistit. Nejspolehlivějším a nejkompaktnějším postupem je modální analýza. Ta nám poskytne i další informace užitečné k pochopení dějů v pneumatice, například tvar vlastního kmitání.

Základem měření pro odhalení módů je měření přenosové funkce, která principiálně vznikne jako podíl odezvy a buzení struktury. Zpravidla nás zajímá odezva na budící sílu. Můžeme použít jak dynamickou tuhost, tak mechanickou impedanci či dynamickou hmotnost a jejich převrácené hodnoty. Spektra libovolné z těchto veličin obsahují potřebné informace.

Módy jsou popsány rezonanční frekvencí, tlumením a tvarem kmitání zkoumané struktury. Jsou vlastností struktury, nezáleží tedy na budící síle, jen na vlastnostech materiálu (tvar, hmotnost, tuhost, tlumení) a na hraničních podmínkách (uchycení struktury). Nemají velikosti, tedy ani jednotky. Jsou však jedinečné pro danou struk-



Obrázek 1: Rozdvojení rezonance – Pirelli 6000, dojezd, asfalt

tu. Z matematického pohledu se jedná o řešení diferenciálních rovnic popisujících lineární stacionární vibrace struktury. Módy se zjišťují modální analýzou, která zpracovává přenosové funkce (podíl odezvy a buzení) volně zavěšené struktury. Výsledkem jsou, na rozdíl od provozních tvarů, hodnoty pro izolované módy neovlivněné nejen buzením, ale ani okolními módy.

Módy v pneumatice se dělí na módy vnitřní dutiny a módy pláště. Módy dutiny se projevují od 200 Hz. Symetrický toroid, kterému se vnitřek pneumatiky blíží, má frekvence módů

$$f_i = i \frac{c}{o}, \quad (4)$$

kde  $i$  je řád módu,  $c$  je rychlost zvuku a  $o$  je obvod ve středu toroidu.

Používané pneumatiky mají obvod ve středu přibližně 1,6 m. Pneumatika se při jízdě zahřívá, předpokládáme teplotu 30 °C, což odpovídá rychlosti zvuku ve vzduchu 350 m/s. Potom módy dutiny budou mít frekvence  $i \times 219$  Hz.

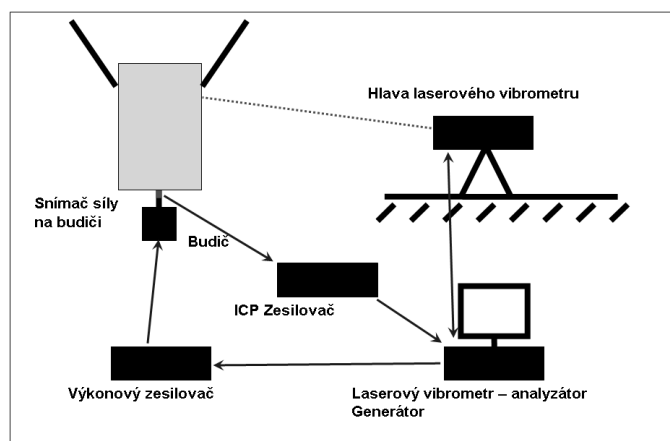
Na módy pláště tento vzorec jednoduše aplikovat nemůžeme. Jednak je obtížné určit obvod – plášť má jiný obvod u ráfku a jiný u běhounu – a jednak nemůžeme počítat s rychlostí zvuku, která je v gumě přibližně 1600 m/s (pak by dle výše zmíněného vzorce měl mít při obvodu 2 m nejnižší mód frekvenci 800 Hz, což je příliš mnoho), protože mód se šíří příčným kmitáním, tedy jinou rychlostí.

Vlna v pneumatice postupuje jak po směru, tak proti směru hodinových ručiček. Při jízdě se kolo otáčí a mód se díky tomu rozštěpuje v důsledku Dopplerova jevu na dva:

$$f_i = i \frac{c \pm v_r}{o}, \quad (5)$$

kde  $v_r$  je rychlost otáčejícího se kola (viz obrázek 1).

Módy pláště začínají již na nižších frekvencích (pod frekvencí 100 Hz). Kmitání způsobené těmito módy má



Obrázek 2: Schéma měření laserovým vibrometrem

tendenci přenášet se na karoserii. Tomu se dá částečně zabránit maximálním možným nepřizpůsobením mezi kolem a karoserií. Také dochází k interakci s módy dutiny. Shoda frekvencí módů pláště a dutiny pneumatiky by tudíž neměla nastat, neboť pak dochází ke skládání a výsledkem je neúnosně velký hluk.

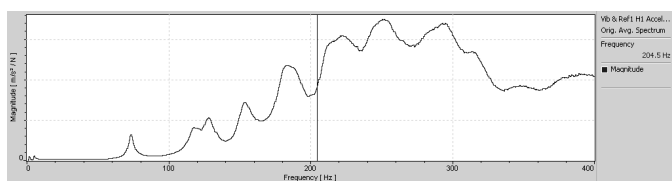
Při měření módů jsem pneumatiku volně zavěsil, což zabránilo lokálnímu tlumení jejího kmitání zemí. Přitom je však nutno dát pozor, aby bylo uchycení dostatečně pevné a umožnilo spolehlivé připevnění budiče. Jako vhodný způsob se ukázalo zavěšení na silně předepjatou gumu.

Na pneumatiku jsem rovnoměrně nalepil kloboučky a na ně pak pomocí vosku připevnil akcelerometry. Měřicí síť měla dvacet bodů na každé straně pneumatiky, vždy po deseti ve dvou soustředných kružnicích, měřil jsem s 10 akcelerometry, takže pro změření všech 40 bodů bylo nutné měření opakovat čtyřikrát. Buzení jsem umístil na přední hranu pneumatiky. Poté jsem zadal přesnou polohu měřících bodů do programu I-DEAS a provedl modální analýzu.

Ukázalo se, že ačkoli je tato metoda použitelná pro zjištění vlastních frekvencí pneumatiky, pro zobrazení a animaci tvaru módů by bylo potřeba měřit na více místech. To je při použití akcelerometrů nepraktické. Klasická podoba modální analýzy je tedy pro měření módů pneumatik nevhodná.

Možným řešením by bylo změřit odezvu pneumatiky pomocí laserového scanovacího vibrometru a následně provést modální analýzu naměřených dat. Kvůli technickým problémům jsem od toho však musel opustit a použil jsem jednodušší metodu měření provozních tvarů.

Provozní tvar znázorňuje skutečnou deformaci struktury při provozním buzení. Velikost budič síly se obvykle nezjišťuje, pouze je třeba registrovat její fázi nebo fázi v libovolném jiném referenčním bodě s ohledem na fázi měřených bodů kvůli animaci. Měří se tedy pouze odezvy na buzení. Měření provozních tvarů laserem je zvláště vhodné pro dynamické pohyby, například rotující části motoru či kol. Vstupem analýzy jsou spektra s fází nebo harmo-



Obrázek 3: Inertanční spektrum ( $a/F$ ) při měření laserovým vibrometrem

nické řezy s fází, výstupem animace kmitů na vybrané frekvenci.

Pro účely měření pneumatik jsem tuto metodu modifikoval měřením vstupní síly a animací přenosových funkcí. Měřil jsem opět na zavěšené pneumatice. Měřicí síť musela být dostatečně hustá, aby umožňovala měření všech zajímavých frekvencí, ale přitom ne zbytečně moc, protože by příliš prodloužila dobu měření. Naštěstí je toto měření poměrně rychlé, takže je možné si menší redundanci dovolit. Použil jsem 3 kruhy po 12 bodech, což teoreticky dostahuje přibližně do 300 Hz.

Pro optimalizaci měřicího postupu jsem experimentoval se směrem buzení – na vnější a vnitřní hranu pneumatiky a do středu běhounu, vždy kolmo na pneumatiku. Také jsem změřil podhuštěnou pneumatiku, abych zjistil vliv tlaku na frekvence rezonancí.

Výsledky se zobrazí jako barevná maska na fotografii měřeného objektu, tedy pneumatiky, kde barva odpovídá hodnotě zvolené přenosové funkce. Je možné zobrazit hodnoty v daném čase (v dané fázi při zvolené frekvenci) nebo jako RMS (efektivní hodnota na daném místě za celou periodu). Při vybudění právě jednoho módu by měly být takovýto graf RMS a graf okamžitých hodnot při vhodné fázi prakticky stejné. Jejich případná odlišnost tedy značí, že vybuděný provozní tvar kmitů neodpovídá jednomu módu.

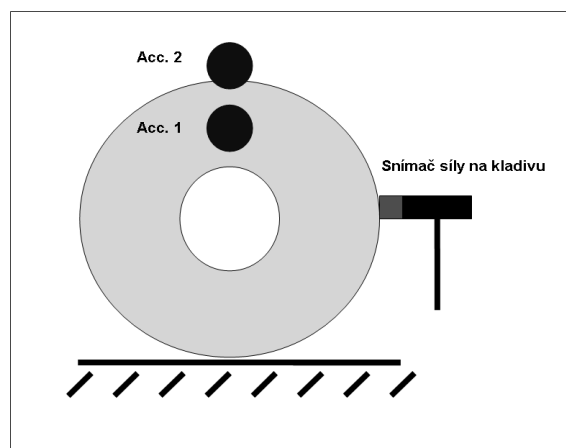
Měření laserovým scanovacím vibrometrem je výrazně jednodušší a časově méně náročné než měření pomocí akcelerometrů. Přitom díky možnosti použít daleko hustší síť měřicích bodů jsou výsledné animace a obrázky přehlednější. Výsledky do frekvence kolem 175 Hz odpovídají skutečným naměřeným módům pneumatiky, navíc se povedlo odhalit i některé módy, které se zdály při modální analýze nevýrazné.

Přibližně nad 250 Hz nelze očekávat spolehlivé výsledky, protože budič nedodává do struktury dostatečnou sílu. Toto omezení však platí pro všechna měření s tímto typem budiče. Omezením měření jen na jednu osu nepřicházíme o žádná důležitá data. Rozdíl frekvencí módů zjištěných při modální analýze a frekvencí odpovídajících provozních tvarů kmitů z vibrometru je cca 2–3 %. To můžeme vzhledem k šířce špiček rezonancí ve spektru a vzhledem k rozptylu naměřených hodnot při měření laserem (byť při buzení v různých místech) považovat za chybu měření.

Při podhuštění na 1,8 bar (tj. o 14 %) nedošlo k žádné výrazné změně provozních tvarů kmitů, pouze frekvence módů mírně poklesla (cca o 3 %), což je vzhledem k odchylce změřených frekvencí módů pomocí I-DEASu a od-



Obrázek 4: Příklad zobrazení tvarů kmitání: 179 Hz, fáze 170°

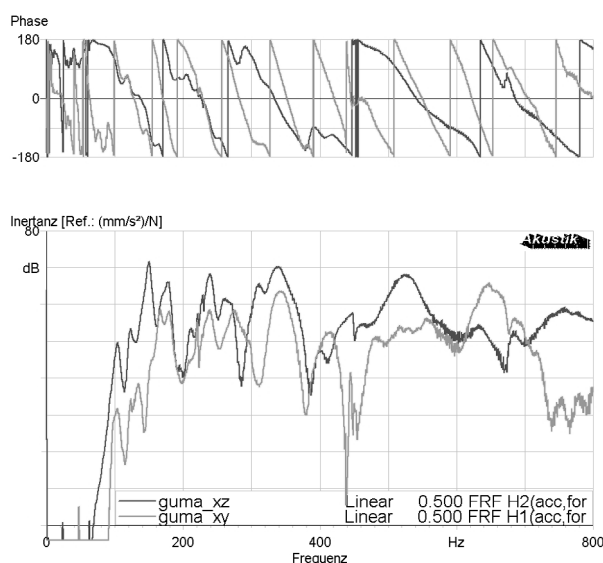


Obrázek 5: Schéma měření přenosové funkce

povídajících provozních tvarů z vibrometru zanedbatelné. Je tedy zřejmé, že tato metoda není příliš citlivá na přesné nahuštění pneumatiky. Také z tohoto měření vyplývá, že se nepodařilo vybudit módy dutiny, čemuž nasvědčují i frekvence změřených módů. Ty by totiž při podhuštění měly měnit frekvenci jinak než módy pláště, protože se šíří v jiném médiu. Definitivní potvrzení bychom získali při naplnění pneumatiky heliem nebo dusíkem.

Co se místa buzení týče, ukázalo se, že buzení na vnitřní hraně je nejvýhodnější, zvláště pro nižší frekvence, které jsou ovšem nejdůležitější – módy jsou vybuděny nejlépe a nedochází k velkému přebuzení v oblasti připojení budiče.

Nejrychlejším a nejjednodušším způsobem zjištění vlastních frekvencí je měření přenosové funkce mezi dvěma místy na pneumatice pomocí rázového kladívka (kladívko se snímačem síly). Tímto způsobem je možné měřit i vyšší frekvence než pomocí scanovacího vibrometru, do struktury se přenesou energie i na vyšších kmitočtech. Měření je rychlé a nenáročné na přístrojové vybavení. Můžeme z něj zjistit kritické rezonanční frekvence, což je obvykle naším cílem. Nejedná se však o měření provozních tvarů,



Obrázek 6: Spektrum přenosových funkcí pro oba směry

takže není možné zobrazit animaci na žádané frekvenci jako u měření vibrometrem, ani provést modální analýzu. Na to by bylo nutné měřit ve více bodech.

Akcelerometr jsem na kolo umístil nejdříve zepředu (ve směru  $y$  v souřadné soustavě automobilu) a poté shora (směr  $z$ ), kladívkem jsem klepal na pneumatiky ze strany kolmo na běhoun, vždy kolmo na oba akcelerometry (směr  $x$ ). Oba snímače (síly na kladivu i akcelerometr) jsem napojil na analyzátor PULSE. Měřil jsem přenosovou funkci H1 (příp. H2) spočtenou z inertancí.

Jak se ukázalo, naměřené rezonance odpovídají vlastním frekvencím zjištěným při modální analýze i při měření laserovým vibrometrem. Je tedy zjevné, že uchycení pneumatiky na automobilu, ač zdeformuje změřené tvary, na rezonanční špičky vliv nemá. Díky tomu je možné výrazně zkrátit dobu nutnou k přípravě měření.

### 3.2. Akustická měření

Vlastní kmity pneumatiky jsou pouze příčinou vzniku jednoho příspěvku k odvalovacímu hluku. Jejich znalost nás nezabavuje nutností měřit především skutečný hluk. K tomu můžeme použít mnoho různých metod. Jednou z velmi zajímavých je subjektivní test. Hodnotí se zpravidla konkrétní typ pneumatik na konkrétním automobilu, a to zkušeným posluchačem. Stupnice mívá kolem 8–10 bodů. Jelikož je nutné testovat různé pneumatiky i s časovým odstupem, je vhodné užít referenčních zvuků pro porovnání.

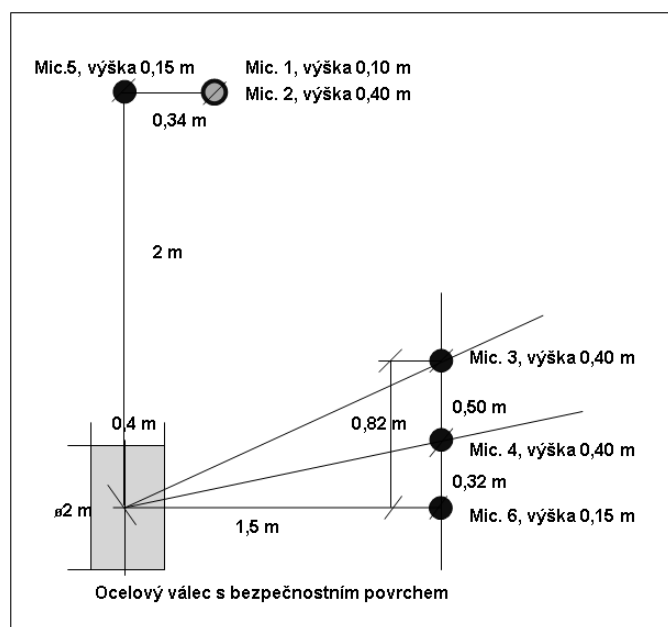
Objektivní akustická měření se dělí na měření vnějšího a vnitřního hluku a dále podle testovacího povrchu na měření na asfaltu, kostkách (které vybudí především hlubší frekvence – vibrace) a na válcovém dynamometru. Pro účely měření hluku pneumatik jsou vhodná především mě-

ření dojezdů, přibližně v rozsahu 100–20 km/h, ale také měření při ustálených rychlostech.

Zabýval jsem se problémem, jak zredukovat potřebný počet měření a zkrátit dobu nutnou k měření na minimum. Zajímalo mě především, zda je možné nahradit měření za ustálených rychlostí pomocí řezů na daných rychlostech získaných z měření dojezdů a také zda měření na válcovém dynamometru odpovídají měření na asfaltu. Vyloučení nutnosti výjezdů na testovací dráhu by totiž zkrátilo dobu nutnou pro měření několikrát. Uniformní povrch dynamometru a absence povětrnostních vlivů by také přispěly k opakovatelnosti měření. Na druhou stranu je zřejmé, že válcový tvar dynamometru by mohl mít výrazný vliv na výsledný odvalovací hluk.

Dalším problémem při měření je výběr vhodného frekvenčního rozsahu a druhu výsledného grafu. I zde je totiž možností větší množství a každá je vhodná pro jiný účel.

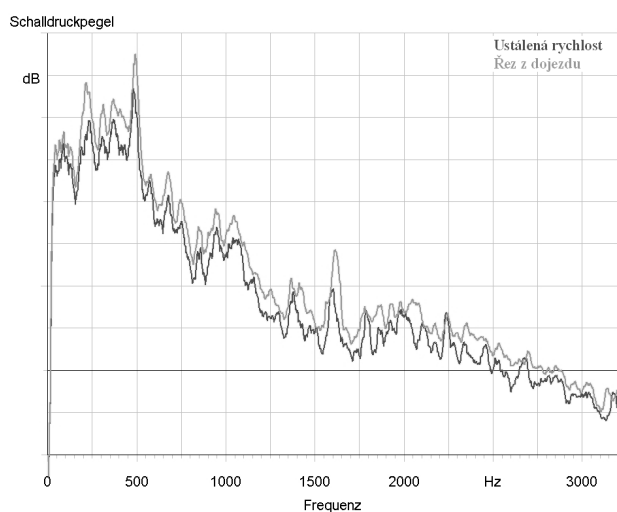
Dojezdy na silnici i na dynamometru jsem měřil ze 100 na 20 km/h s vypnutým motorem, vzorky nabíral každý 1 km/h nebo u měření ustálenou rychlostí každou 1 s a spektra průměroval ze 3 měření. Údaje o rychlosti jsem odebíral ze sběrnice CAN. Zvolil jsem tzv. tachometrovou rychlost, tedy rychlost, která se zobrazuje na tachometru a je o několik procent větší než skutečná. Její výhodou je zaprvé snazší měření zvláště ustálených rychlostí – řidič může použít palubního tachometru – a zadruhé možnost jednoduše najít na výsledném grafu problémy lokalizované poslechem při zkušebních jízdách nebo zákazníci – při zjištění problému na dané rychlosti poslechem se posluchač orientuje právě podle palubního tachometru. Pro měření při ustálené rychlosti jsem vybral 30 km/h pro dlažbu a 50, 70 a 90 km/h pro asfalt. Tyto hodnoty tvoří průřez celým dojezdem a zároveň se jedná o všechny běžné po-



Obrázek 7: Schéma měření vnějšího hluku

užívané rychlosti. Při měření za ustálených rychlostí na válcovém dynamometru jsem měřil pouze při 50 km/h, protože se ukázalo, že to dostačuje. Přitom jsem poháněl automobil dynamometrem, což sice vnáší do měření další odchylku vůči jízdě po silnici, ale na druhou stranu je jednodušší, opakovatelné a eliminuje hluk motoru, což bylo nutné zejména pro měření vnějšího hluku.

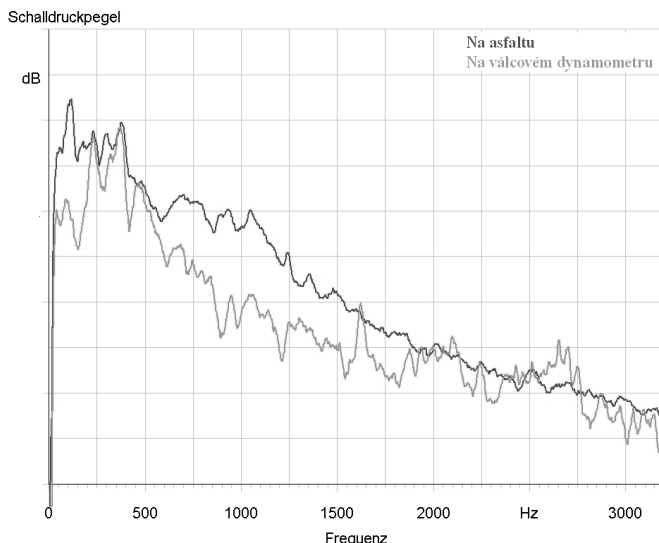
Při měření vnitřního hluku jsem mikrofony umístil do oblasti uší všech čtyř pasažérů. Při měření vnějšího hluku jsem vycházel z metodik firem Pirelli (mikrofony 3 a 4) a Semperit (mikrofon 1 – přibližně ve směru maxima směrové charakteristiky vyzařování hluku pneumatikou), pro ověření těchto metodik a hlubší porozumění vyzařování hluku jsem však přidal ještě další tři mikrofony, viz schéma na obrázku 7.



Obrázek 8: Porovnání průměrného spektra při ustálené rychlosti a řezu z dojezdu (vnitřní hluk)

Jak je vidět z grafu na obrázku 8, spektra se při ustálené rychlosti prakticky shodují s řezem na odpovídající rychlosti z dojezdu. Se změnou rychlosti se však mění poměrně rychle, je nutné zvolit řez dojezdem přesně. Rozdíly spekter jsou způsobené tím, že některé rezonance ke svému vybudění potřebují stejné buzení po delší dobu, jiné je naopak třeba budit dynamicky. U většiny rezonancí na způsobu buzení nezáleží, nebo na něj nejsou tak citlivé. Na měřených pneumatikách se vyskytlo několik rezonancí vybuděných pouze při dojezdu, opačných případů pak bylo minimum. Dá se tedy říci, že je zbytečné ustálené rychlosti měřit, máme-li k dispozici dojezdy.

Měření na válcovém dynamometru je několikrát rychlejší než měření na asfaltu. Jednak je k dispozici veškeré zázemí, dále není nutné měření pneumatiky (v případě měření více vzorků) nikam převážet, a v neposlední řadě je také důležité, že zatímco pro měření na vozovce je potřeba dvou lidí (řidič a obsluha přístrojů – samotný člověk nemůže dávat stále pozor na měřené hodnoty, a tudíž může něco přehlédnout, nehledě na bezpečnost práce), měření na válcích zvládne jeden člověk pohodlně. Proto by bylo



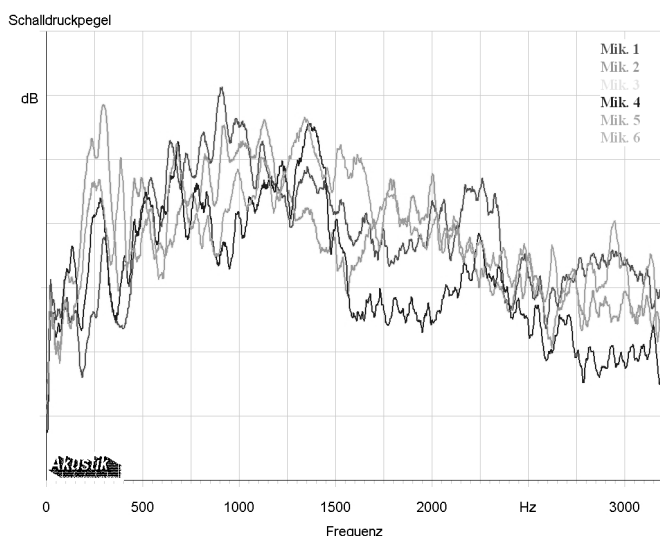
Obrázek 9: Porovnání průměrných spekter z dojezdu na válcovém dynamometru a na asfaltu (vnitřní hluk)

výhodné, kdyby nebylo nutné měření na silnici provádět a stačilo měření na válcích.

Jak ale vyplývá z výsledků, spektra z válců a ze silnice se výrazně liší. Jedním z důvodů je zřejmě tvar válců – podmínky při styku pneumatiky s podložkou musí být jiné u válce a jiné u roviny. Druhým důvodem je struktura povrchu – na válcích je povrch, ač hrubý, velice pravidelný a bez jakýchkoliv větších nerovností. Buzení pneumatiky je pak uniformní, což může mít za následek vybudění rezonancí ve vzorku, které se u skutečného asfaltu v důsledku náhodného buzení příliš neprojeví. Třetím důvodem je rozdíl ve směru namáhání pneumatiky – zatímco na silnici je automobil poháněn motorem, na válcích při těchto testech byl automobil poháněn válci, tedy síly působící na pneumatiku měly opačný směr. Dále se může projevit absence parazitních zvuků – aerohluků a hluků motoru, což je jediný důvod pro odlišnost spekter, který bychom vítali.

Jelikož měření na asfaltu odpovídá cílenému použití automobilu, můžeme ho použít jako referenci. Pak je zjevné, že vzhledem k přílišné odlišnosti spekter změřených na válcovém dynamometru je tento pro měření hluku pneumatik nevhodný.

Vnější hluk je poměrně silně závislý na pozici mikrofону, zvláště na úhlu mezi osou kola a mikrofonom. Při měření však není možné používat všech 6 mikrofónů kvůli nepřehlednosti výsledků a obtížnosti porovnání několika takto změřených pneumatik. Největší rozdíl je v datech z mikrofónů poblíž osy pneumatiky a od mikrofónů přibližně ve směru jízdy. Ukázalo se, že samotný mikrofon na pozici 3 nezohlední dostatečně hluky ve směru jízdy i v boku. Ideální by tedy bylo měřit se dvěma mikrofony. Mikrofony umístěné přímo ve směru jízdy a v boku jsou příliš specifické, než aby mohly reprezentovat větší rozsah úhlů. Mikrofon na pozici 1 naměřil spektra plošší než mikrofon na stejném místě ve výšce 40 cm. Proto myslím, že je nej-



Obrázek 10: Spektra ze všech mikrofonů při měření vnějšího hluku na válcovém dynamometru

výhodnější měřit s mikrofony na pozici 1 a 4, při potřebě data dále zredukovat je možné vypočítat obálku obou mikrofonů a celých dojezdů a zobrazit výslednou křivku jako 2D spektrum. (Zatímco při měření na asfaltu je obálka nevhodná, protože najetí na díru ve vozovce by měření znehodnotilo, a je lepší při potřebě redukce dat užít průměr, při měření na válcích tento problém nehrozí, a proto je výhodnější obálka, která lépe zachytí všechny problémy.)

Často je nutné porovnat větší množství pneumatik, tedy seřadit je od nejlepší k nejhorší, nikoli je analyzovat. Přitom je nezbytné maximálně redukovat data. Je třeba měřit jen nezbytně nutné hodnoty. Jen někdy je ještě navíc třeba identifikovat problémy na jednotlivých pneumatikách, kvůli kterým nevyhovují. Proto je třeba měřit vnitřní hluk při dojezdech na silnici, což je nejdůležitější měření, a zobrazit v tomto případě průměrná 2D spektra za celý dojezd a všechny mikrofony. Také je pro toto použití výhodné zobrazit průměrná 2D třetinooktávová spektra místo klasické FFT analýzy. Odpovídají více lidskému vnímání hluku a jednotlivé pneumatiky jsou lépe porovnatelné.

#### 4. Závěr

Měření hluku pneumatik v současné době v souvislosti s poklesem hluku motoru nabývá stále více na významu. Metodik pro měření a následně různých způsobů zpracování je však velké množství. Není možné vybrat jednu univerzálně nejlepší. I nejvhodnější metodika již při drobné změně účelu náhle nemusí vyhovovat.

Pro představu o vnitřním hluku od pneumatiky je nejvhodnější sonogram z dojezdu na hladkém asfaltu ze 100 na 20 km/h zobrazený do 800 Hz, na kterém jsou zobrazeny nejdůležitější frekvence a zároveň umožňuje jasně odlišit rezonance od harmonických. Měřicího technika na něm také nemůže zmást rozštěpení rezonance v důsledku otáčení kola.

Dále pro porovnávání problému na více pneumatikách je nejvhodnější průměrné 2D FFT spektrum z celého dojezdu a všech mikrofonů, zobrazené do 3200 Hz, případně jeho výřez.

Pro potvrzení, že zdroj problému spočívá v rezonanci pneumatiky, je vhodné měření přenosové funkce pneumatiky pomocí dvou akcelerometrů (přenos mezi směry  $x$ - $y$  a  $x$ - $z$ ) a impulzního kladívka na zavěšené pneumatice.

A pro porovnání více pneumatik pro zjištění jejich celkové hlučnosti a akustického komfortu nejlépe poslouží třetinooktávové 2D spektrum z téhož dojezdu a stejných průměrů jako výše zmíněné 2D spektrum získané FFT.

Měření na válcovém dynamometru není vzhledem k odlišnosti spektra od dojezdů na vozovce vhodné.

Při analýze rezonancí pneumatik je nejjednodušší a nejrychlejší, přitom plně dostatečné, použít kladívko (viz výše). Je-li přesto potřeba důkladnější analýza, je nejvýhodnější měřit pomocí laserového vibrometru. Při analýzách na vyšších frekvencích by pak bylo vhodné provést na základě takto naměřených dat modální analýzu.

#### Poděkování

Rád bych poděkoval za pomoc při přípravě podkladů pro tento článek pracovníkům oddělení hluku a vibrací ve firmě Škoda Auto, a. s.

#### Reference

- [1] Pelant, L.: *Hluk pneumatik*, [Diplomová práce], FEL ČVUT, Praha, 2005.
- [2] Beneš, T.: *Modální analýza vnitřního prostoru automobilu*, [Diplomová práce], FEL ČVUT, Praha, 2000.
- [3] Klingenberg, H.: *Automobil-Meßtechnik: Band A: Akustik, 2. vyd.*, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [4] Brüel & Kjær, *Vibration Testing*: K. Larsen & Søn, Glostrup, [1990].



---

Akustické listy: ročník 11, číslo 2      červen 2005

ISSN: 1212-4702

Vydavatel: Česká akustická společnost, Technická 2, 166 27 Praha 6

Vytisklo: Ediční středisko ČVUT

Počet stran: 16

Počet výtisků: 200

Redakční rada: M. Brothánek, O. Jiříček, J. Kozák, R. Čmejla, F. Kadlec, J. Štěpánek, P. Urban, J. Burčík

Jazyková úprava: R. Štěchová

© ČsAS

Uzávěrka příštího čísla Akustických listů je 31. srpna 2005.

NEPRODEJNÉ!