

Sledování vibračních spekter ložisek bubnu prašného pásu

RNDr. Milan Neubert¹, Ing. Vitaliy Velychko¹, doc. RNDr. Jan Nedbal, CSc.², RNDr. Helena Valentová, Ph.D.²,
Ing. Petr Klouda³

¹VVV MOST spol. s r.o., Most, neubert@vvvmost.cz

²Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra makromolekulární fyziky, Praha

³Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most

Přijato: 5. 8. 2010, recenzováno: 8. 11. a 9. 11. 2010

Abstrakt

Vyvinuli jsme diagnostické zařízení, které je možno levně zabudovat do konstrukce bubnů a které kontinuálně měří jejich vibrační charakteristiky, sleduje jejich časový vývoj a indikuje možnou poruchu ložisek. Měření vibrací je založeno na akcelerometru firmy Kionix. Rychlá Fourierova transformace prováděná průmyslovým PC poskytuje spektrum snímaných frekvencí od 10^{-1} Hz do 10^3 Hz. Prototyp zařízení byl testován v provozu Dolů Nástup Tušimice a výsledky měření byly srovnávány se současně prováděnými měřeními komerčním mobilním zařízením. V tomto příspěvku analyzujeme vibrační spektrum ložisek bubnu prašného dopravníku.

Monitoring of dust conveyor drum bearing vibration spectrum

We developed a diagnostic device that can be cheaply incorporated into drums in order to measure their vibration characteristics continuously, to monitor their time development, and to forecast possible breaks of bearings. Vibration measurement is based on a Kionix accelerometer. Fast Fourier transformation performed by an industrial PC presents a frequency spectrum from 10^{-1} Hz to 10^3 Hz. A prototype of the device was tested during operations at the mine Nástup Tušimice and the results were compared with simultaneous measurements performed by commercial mobile equipment. This paper analyses vibration spectrum of a dust conveyor drum bearings.

Monitoring von Vibrationsspektren der Trommellager des Staubbandes

Wir entwickelten eine Diagnostikanlage, die sich billig in die Trommelkonstruktion einbauen ließ und die kontinuierlich deren Vibrationscharakteristiken misst, die deren zeitliche Entwicklung verfolgt und möglich Störung der Lager anzeigt. Die Messung von Vibrationen basiert auf dem Akzelerometer der Firma Kionix. Eine schnelle Fourier-Transformation, durchgeführt mit einem industriellen PC, bietet das Spektrum von abgetasteten Frequenzen ab 10^{-1} Hz bis 10^3 Hz. Ein Prototyp der Anlage wurde im Betrieb des Tagebaus Nástup Tušimice getestet und die Messungsergebnisse wurden mit den gleichzeitig an einer kommerziellen mobilen Anlage durchgeführten Messungen verglichen. In diesem Beitrag analysieren wir das Vibrationsspektrum der Trommellager vom Staubbördere.

Klíčová slova: pásový dopravník, ložisko, vibrace, diagnostika.

Keywords: belt conveyor, bearing, vibration, diagnostics.

1 Úvod

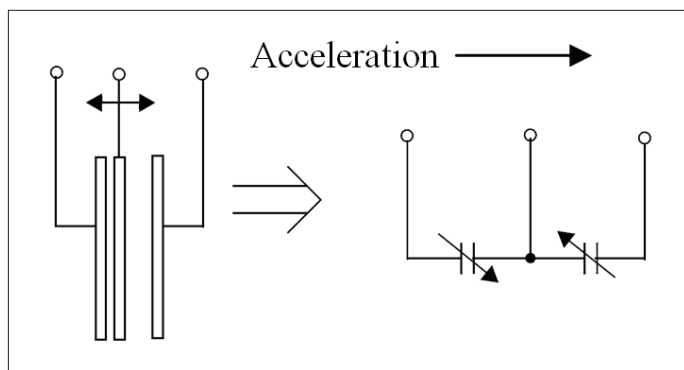
Při těžbě energetických surovin, zejména v povrchových dolech, se pro dopravu vytěženého materiálu používá dálkové pásové dopravy (DPD). Jednotlivé díly pásových dopravníků (PD) přitom pracují v těžkých provozních podmínkách, a jsou proto vystaveny mimořádnému namáhání, které se projeví jejich zvýšenou poruchovostí, a tím i zkrácením jejich životnosti.

Mezi nejporuchovější díly PD patří ložiska bubnů a válečků, minimalizující tření mezi pohyblivými a stacionárními částmi PD. Přes veškeré konstrukční snahy, vývoj nových mazadel a další provozní opatření zmenšující prašnost apod., mají dotykové povrchy uvnitř ložisek daleko do ideálu a jejich příslušné koeficienty tření se mění v čase a místě, což ve svém důsledku vede ke vzniku vibrací a k dalšímu nárůstu tření, a tedy i ke zvýšení provozní teploty strojních dílů s ložisky. V důsledku shora uvedených skutečností může být doba života exponovaných ložisek velmi krátká, např. u ložisek bubnů na stanicích DPD musí být některá měněna již po několika měsících provozu. Přitom takové neplánované odstávky, způsobené poškozenými ložisky, mají obvykle za následek velké ekonomické provozní ztráty.

Abychom zabránili vzniku takových mimořádných situací nebo alespoň jejich výskyt minimalizovali, navrhli jsme technické řešení, umožňující průběžnou kontrolu stavu ložisek měřením jejich vibrací, neboť amplituda a frekvenční spektrum



Obr. 1: Komerční MEMS akcelerometr (zvětšeno, plastové pouzdro 5 x 5 x 1,2 mm)



Obr. 2: Principiální propojení tří mikroelektrod MEMS akcelerometru

vibrací patří mezi významné fyzikální charakteristiky, determinující provozní stav ložisek [1]. Vibracemi přitom rozumíme jak periodické, tak i nahodilé mechanické oscilace jednotlivých částí ložisek kolem jejich rovnovážných poloh. Domníváme se, že námi navržené technické řešení pomůže provozovatelům PD optimalizovat jejich údržbu a včas detekovat neobvyklé zhoršení provozních podmínek, aby nedocházelo k neplánovaným odstávkám. K tomuto cíli by měla vést naše snaha vybavit strojní části s provozně kritickými ložisky nízkonákladovým zařízením, které průběžně měří jejich vibrace a vyhodnocuje změny, k nimž během provozu dochází.

Našemu záměru nalézt při řešení problému kompromis mezi citlivostí, frekvenčním rozsahem, spotřebou energie a cenou měřicího zařízení nejlépe vyhověly senzory vibrací vybavené vlastní elektronikou, které jsou vyráběny mikroelektro-mechanickou (MEMS) technologií. Takové systémy jsou vyráběny na společném křemíkovém substrátu, kde jsou integrovány elektro a mikromechanické prvky (senzory) a obslužná elektronika. Sama elektronika se vyrábí standardními procesy známými z výroby integrovaných obvodů, ale mikromechanické komponenty se tvoří pomocí mikromechanických procesů, které buď selektivně odstraňují části křemíkového substrátu, nebo naopak přidávají nové strukturální prvky a vrstvy s cílem vytvořit vhodná mechanická či elektromechanická zařízení. Tato technologie umožňuje vyrábět akcelerometr s menšími rozměry, nižší hmotností a za relativně nízkou cenu (5-20 \$ za kus) v porovnání se standardními akcelerometry [2].

2 MEMS akcelerometr

Kapacitní MEMS akcelerometry využívají pro měření zrychlení (akcelerační) spřažené změny kapacity dvou mikrokondenzátorů, k níž dochází při změnách polohy prostřední ze tří mikroelektrod.

Poloha střední pohyblivé mikroelektrody závisí na velikosti síly F

$$F = m \cdot a,$$

působící na akcelerometr, resp. na velikosti zrychlení a , které tato síla udělí pohyblivému nosníku mikroelektrody o hmotnosti m . Střední poloha této měrné elektrody je vzhledem ke krajním pevným elektrodám v klidovém stavu fixována pomocí mikropružin.

Závislost kapacity C deskového vzduchového kondenzátoru je pak dána [3] standardním vztahem

$$C \approx \varepsilon_0 S/d,$$

kde S je plocha elektrod, d je jejich vzdálenost a ε_0 je permitivita vakua.

Pro realizaci prototypu měřicího zařízení jsme zvolili akcelerometr KXP84 (viz obrázek č. 3) společnosti Kionix, který plně vyhovuje našim požadavkům, neboť má velmi malé rozměry (5x5x1,2 mm), vysokou teplotní stabilitu, nízkou spotřebu energie, nastavitelný rozsah zrychlení, nízkošumový 12bitový AD převodník a digitální výstup [2]. Obvod obsahuje tříosý digitální akcelerometr s provozním rozsahem zrychlení ± 2 g, teplotním rozsahem $-40^\circ\text{C} \div 85^\circ\text{C}$, šířkou signálu 3 500 Hz (pro osy X a Y) a 1 700 Hz pro osu Z. Zabudovaná měřicí elektronika převádí zvlášť pro každou osu snímání (kanál) změnu kapacity na změnu napětí a zpracovává takto získaný, následně filtrovaný signál zahrnující kompenzaci vlivu teplotních změn na standardní lineární napěťový výstup, s dobře definovanou převodní konstantou – citlivostí (hodnota g/V).

3 Činnost funkčního prototypu měřiče vibrací

Funkční prototyp digitálního měřiče vibrací se skládá z modulu digitálního akcelerometru KXP84 (obrázek č. 4) a průmyslového počítače, který byl pro záznam a vyhodnocování naměřených dat zvolen s ohledem na své nesporné přednosti, jako jsou malé rozměry (130x110x47 mm), široký rozsah provozních teplot ($-40^\circ\text{C} \div 85^\circ\text{C}$) a dobrá odolnost vůči prachu, vlhkosti a vibracím.

Zpracování naměřených dat jsme prováděli převážně pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) [5]. Jedná se o zjednodušenou digitální (diskrétní) verzi integrální transformace, jejíž předností je možnost vyjádřit získaná data nikoliv v časové, ale ve frekvenční škále. Jinými slovy řečeno, pomocí FFT můžeme časově závislý signál vyjádřit pomocí harmonických signálů, tj. ve frekvenční spektrální oblasti. Tento přístup umožňuje vyhodnocovat periodicky se opakující poruchy stavu testovaných ložisek, které jsou z hlediska jejich životnosti rozhodující.

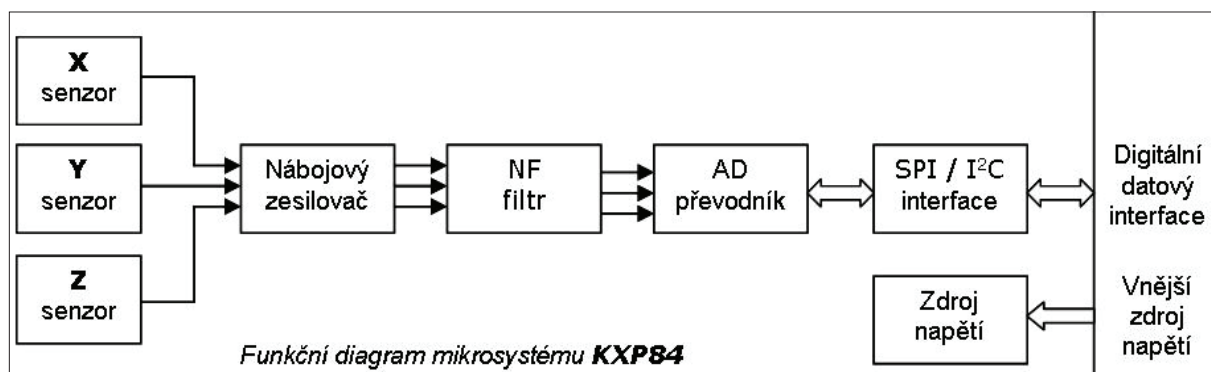
Základní rovnice popisující vlastní Fourierovu transformaci se obvykle píše ve tvaru

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (1)$$

Rovnice (1) definuje vztah mezi časově proměnnou veličinou $s(t)$ a frekvenčně závislou veličinou $S(\omega)$. Tato dvojice ($s(t)$, $S(\omega)$) se ve Fourierově transformaci nazývá originál a obraz.

V technické oblasti, která nás pro vyhodnocení vibrací zajímá, znamená ω úhlovou frekvenci (2π násobek standardní frekvence f) a $S(\omega)$ představuje frekvenční spektrum měřeného časově proměnného signálu $s(t)$, tedy v našem konkrétním případě časového průběhu měřeného zrychlení sledované strojní části.

Naše zařízení snímá měřenou veličinu v pravidelných časových intervalech po 250 μs (odpovídajících maximálně



Obr. 3: Blokové schéma 3D akcelerometru KXP84 [4]

povolenému taktovacímu kmitočtu 4 kHz) a následně tuto časovou řadu zpracuje počítač pomocí diskretní FFT.

Spočtené spektrum $S(\omega)$ je komplexní veličinou, a lze ji proto vyjádřit ve tvaru

$$S(\omega) = |S(\omega)| e^{i \arg S(\omega)}. \quad (2)$$

Velikost $|S(\omega)|$ nazýváme amplitudové spektrum a úhel $\arg S(\omega)$ představuje fázové spektrum transformovaného signálu. Dále budeme pro vyhodnocení získaných experimentálních dat diskutovat pouze amplitudové spektrum.

Zároveň musíme mít na paměti, že z vlastností FFT vyplývá omezení frekvenčního rozsahu, kde můžeme obraz měřeného signálu vyhodnotit a kde ho lze věrohodně interpretovat.

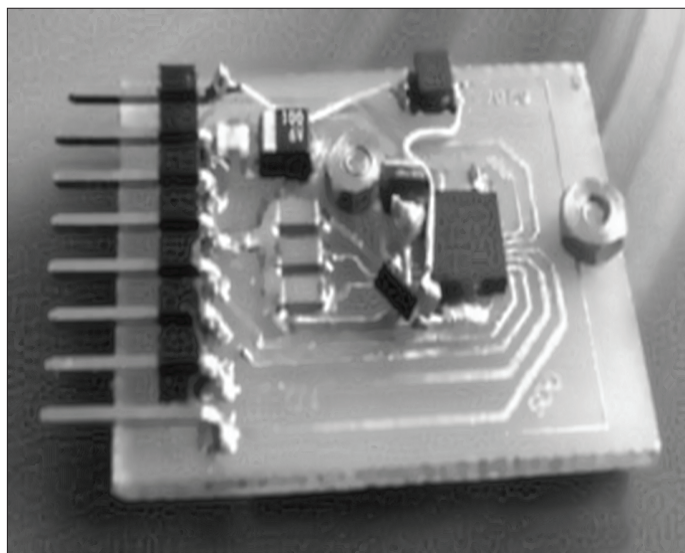
4 Provozní měření a zpracování dat

Prototyp digitálního systému měření vibrací byl poprvé vyzkoušen závěrem roku 2009 na šachtě v Tušimicích ve spolupráci s VÚHU a.s., Most. Měřily se vibrace ložisek vratného bubnu a bubnu prašného pásu na stanici DPD, a to současně jak vlastním prototypem, tak i komerčním systémem, sestaveným z měřicí jednotky EMS DV 803 a snímače vibrací B2 od firmy Seika [4].

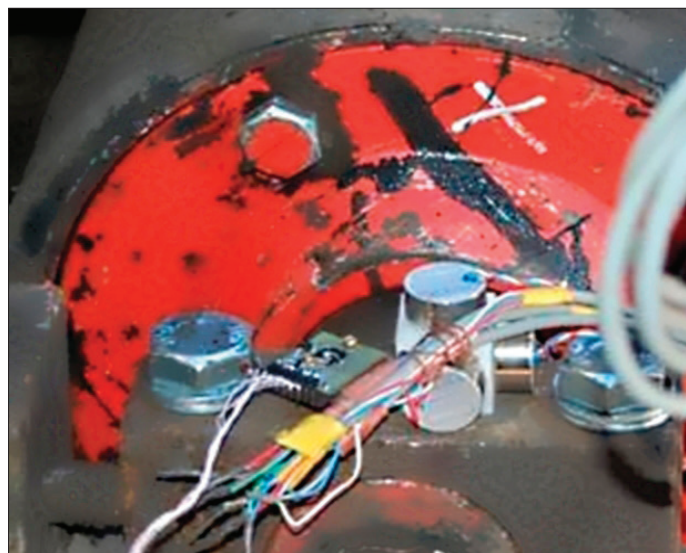
Čidla obou měřicích systémů se magneticky připoutala na uchycovací domky hřídelí bubnů, jak demonstrujeme na obrázku č. 5.

Byly změřeny a ukládány hodnoty zrychlení ve třech na sebe kolmých směrech po dobu několika minut. Na obrázku č. 6 uvádíme amplitudové spektrum, tj. výsledek diskretní FFT provedené pro časovou řadu hodnot zrychlení snímaného ve vertikálním směru, a to jednak pro všechna získaná data, jednak pro náhodný výběr 4 096 za sebou jdoucích záznamů.

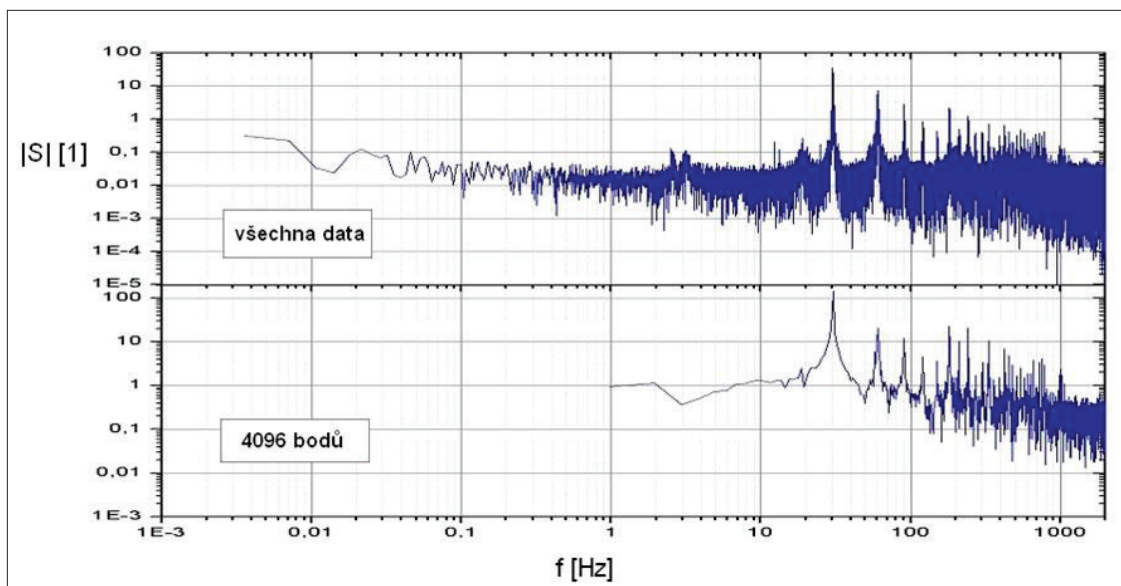
Takto získané amplitudové spektrum je frekvenčně omezeno. Shora je omezeno polovinou vzorkovací frekvence (2 kHz), zdola pak celkovou dobou sledování signálu, tj. počtem časově ekvidistantních záznamů. Proto je frekvenční okno v dolní polovině obrázku č. 6 podstatně užší (šířce časového okna $4\,096 \times 250\,\mu\text{s} = 1\,\text{s}$ odpovídá dolní kmitočtu 1 Hz). Věrohodný obraz je však s ohledem na systematickou chybu metody FFT frekvenčně ještě užší, zejména pak na straně nízkých kmitočtů (jeden frekvenční řád). Zvolené provozní omezení našeho zařízení na opakovaný výpočet FFT z 4 096 za sebou následujících bodů bude sice podle našeho názoru poskytovat dostatečný pohled na celkový stav ložisek a jeho časový vývoj, ale pro přesnější interpretaci FFT obrazu jsme se pro účely tohoto příspěvku rozhodli pracovat s celým časovým záznamem.



Obr. 4: Prototyp desky se senzorem vibrací



Obr. 5: Příklad uchycení čidel na domku bubnu prašného pásu



Obr. 6: Amplitudové FFT spektrum (našore celý záznam, dole vybraných 4 096 bodů)

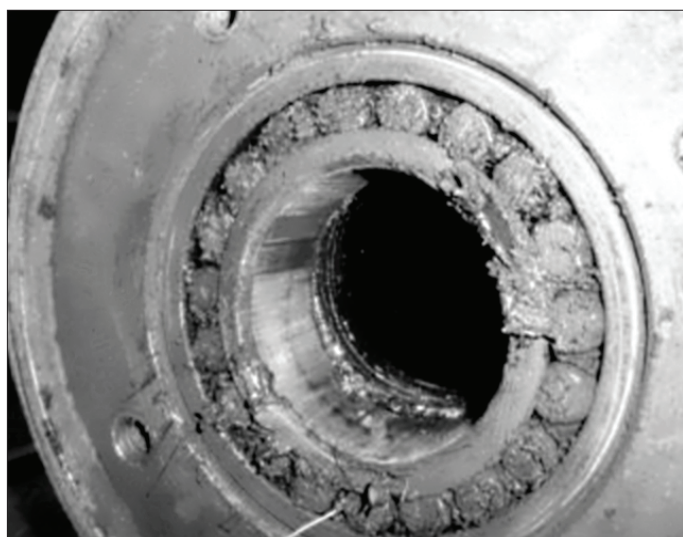
Vlastní měření vibrací bylo provedeno záhy po výměně vratného bubnu prašného pásu. Proto jsou v amplitudovém spektru dobře viditelné jednotlivé spektrální čáry (ostrá lokální maxima) odpovídající počínajícím poruchám ložisek bubnu.

Na tomto místě je třeba připomenout, že měření vibrací (zrychlení) na domku hřídele vratného bubnu zaznamená nejen poruchy vznikající na blízkém ložisku, ale že zobrazí i poruchy, které se šíří z jiných zdrojů podél hřídele, podél ocelové konstrukce nebo podél prašného pásu. V našem konkrétním případě lze očekávat přítomnost (utlumeného) signálu od druhého ložiska, od blízkého vratného bubnu hlavního pásu nebo od hnacího bubnu prašného pásu.

Pro jednoznačnou identifikaci jednotlivých zdrojů poruch by bylo třeba současně sledovat a porovnávat vibrační charakteristiky a jejich vzájemné korelace získané z většího počtu exponovaných míst. To je ostatně jedním z cílů projektu, v jehož rámci popisované měřicí zařízení vzniklo.

Vraťme se však k námi sledovanému vratnému bubnu prašného pásu. Když po několika následujících měsících vedl jeho stav k nutnosti výměny za buben s novými ložisky, dostali jsme možnost provést demontáž ložisek ze starého bubnu. Pohled na čelo bubnu po sejmutí ochranného krytu a extrakci hřídele lze vidět na obrázku č. 7.

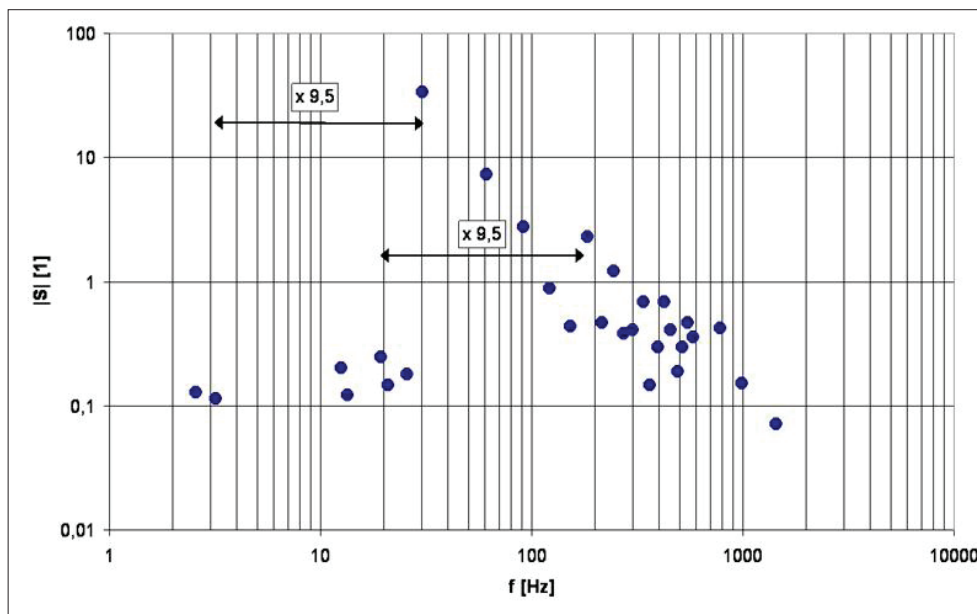
Uprostřed bubnu s vnějším průměrem 25 cm lze vidět dvouřadé soudečkové ložisko o vnějším průměru 160 mm a vnitřním průměru pro hřídel 90 mm. Ložisko (např. FAG22218ES) má na obvodu 19 soudečkových válečků, pohybujících se v prostoru, který je ze stran ložiska vymezen tabulkovými průměry 144 mm a 106 mm. Aritmetický průměr (125 mm) těchto dvou hodnot určuje průměr kružnice, po níž se pohybují středy vnějších čel soudečkových válečků (roztečný průměr), a polovina rozdílu těchto hodnot (19 mm) vymezuje prostor, do něž se musí každý váleček vejít. Skutečný největší průměr soudečkových válečků, který jsme při demontáži ložisek (viz obrázek č. 8) naměřili, činil 17,8 mm.



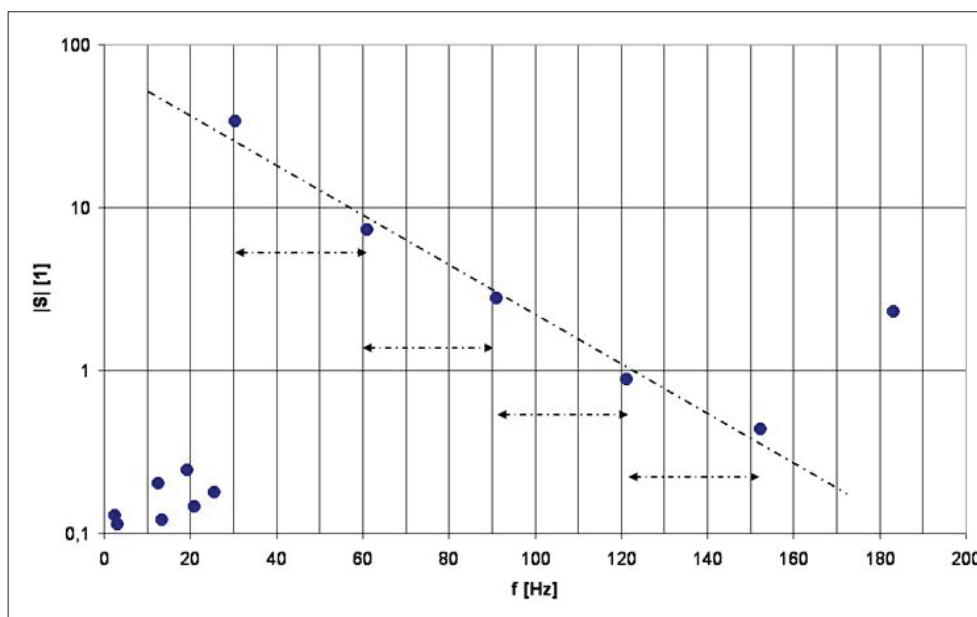
Obr. 7: Čelo bubnu prašného pásu



Obr. 8: Demontované válečky a poškozená klec ložiska



Obr. 9: Hlavní čáry amplitudového FFT spektra (logaritmická frekvenční škála)



Obr. 10: Nizkofrekvenční čáry amplitudového FFT spektra (lineární frekvenční škála)

Uvedené rozměry a počty jsou určující pro identifikaci ložiskových závad [5], protože pro případ neprokluzování valivých elementů umožňují odhadnout první harmonické jednotlivých typů poškození vůči základní frekvenci relativního pohybu vnitřního a vnějšího kroužku ložiska, tj. v našem případě vratného bubnu kolem pevné hřídele.

Prvním krokem identifikace poruch musí být stanovení základní frekvence otáčení bubnu. Z videozáznamu jsme věděli, že musíme hledat maximum někde těsně nad 3 Hz. Toto maximum jsme skutečně našli u kmitočtu 3,2 Hz (viz obrázek č. 6). Druhým krokem identifikace bylo hledání frekvencí pohybu klece, kroužku a valivých prvků. Ty by měly být v prvním přiblížení násobky základního kmitočtu, a to po řadě 0,5; 9,5; 3,6 násobkem. Ani kolem 1,6 Hz, ani kolem 11,6 Hz

jsme však žádná maxima nenalezli, takže jsme mohli vyloučit výraznější poškození klece nebo valivých prvků v této počáteční fázi opotřebení sledovaného ložiska.

Na obrázcích č. 9 a 10 uvádíme pro lepší orientaci ve frekvenčním spektru amplitudy $|S(\omega)|$ a frekvenční polohy hlavních zjištěných maxim (FFT čar). Frekvenční škála obrázku č. 9 je logaritmická. Takové zobrazení frekvencí maxim umožňuje zobrazit všechny významné frekvence a zároveň lépe vyhledat násobky kmitočtů.

V amplitudovém spektru nalezená poměrně silná čára u 30,4 Hz svědčí o detekci poruchy kroužku. Silným argumentem pro toto tvrzení je i přítomnost několika vyšších harmonických frekvencí s postupně klesající hodnotou amplitudy – viz obrázek č. 10.

Pokles amplitudy u vyšších harmonických (násobků 30,4 Hz) je vyznačen v obrázku č. 10 šrafovanou čarou. S ohledem na logaritmickou vertikální škálu můžeme konstatovat, že tento pokles má zhruba exponenciální charakter.

Pro interpretaci dalších spektrálních čar by bylo zapotřebí provádět další paralelní měření vibrací na konstrukci stanice dálkové pásové dopravy, jak jsme již zmínili výše.

5 Závěr

Výsledky měření a jejich možná interpretace nás opravňují ke konstatování, že námi navržené a realizované kontinuální měřicí zařízení vykazuje dobrou citlivost a přesnost i v porovnání s podstatně dražším profesionálním zařízením. To svědčí o tom, že realizovaný prototyp by se mohl stát běžným diagnostickým nástrojem při sledování vzniku a časového vývoje poruch klíčových mechanických částí složitých průmyslových zařízení.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl při řešení projektu FR-TI1/537 „Komplexní diagnostický systém pro pásovou dopravu“ v rámci programu TIP řízeného MPO ČR.

Literatura

- [1] KREIDL M., ŠMÍD R.: *Technická diagnostika, senzory – metody – analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 406 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [2] URL:<<http://www.kionix.com/>> [cit. 2010-07-10].
- [3] KREMER F., SCHONHALS A.: *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2002. ISBN 3-540-43407-0.
- [4] URL:<<http://www.seika.de/>> [cit. 2010-07-15].
- [5] VALENT O., GALÁD M., KAČMÁR L.: *Technická diagnostika 1*. Praha: CMMS, 2010.