

# Měření vibrací a analýza ustavení troubového mlýna

Pracovníci Zkušební laboratoře VCSVTT z Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (RCMT – Research Center of Manufacturing technology) byli přizváni k měření vibrací a geometrie troubového mlýna, resp. k měření stavu soustrojí po rekonstrukci kluzného ložiska hlavní hřídele, protože po montáži vyvstala otázka nadměrného hluku a vibrací. Měření bylo realizováno ve dvou časově oddělených etapách. V rámci prvotní analýzy proběhlo měření vibrací na vybraných místech mlýna včetně kvazistatického pohybu hřídele mlýna při rozběhu. Po odkrytí následovala analýza geometrie a ustavení mlýna. Souběžně byly odebrány vzorky mazacího oleje v převodu předloha-věnc a v ložiskách hlavní hřídele mlýna.

Ing. Petr Chvojka, Ph.D.,  
Ing. David Burian,  
Ing. Martin Morávek  
RCMT a Ústav výrobních strojů  
a zařízení, FS ČVUT v Praze



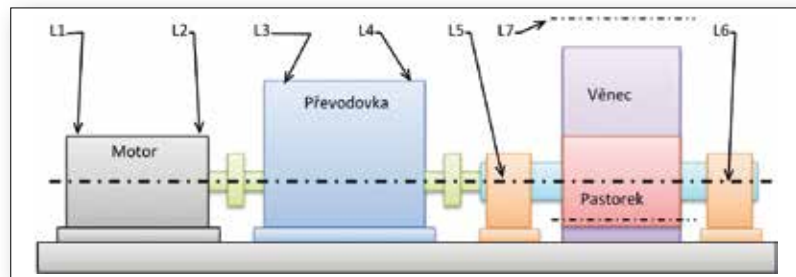
Obr. 1 Foto pohonu troubového mlýna

## Analýza vibrací

Vibrace byly měřeny jednoosými akcelerometry ve třech směrech – horizontálně, vertikálně a axiálně. Na obrázku 2 je znázorněno schéma pohonu troubového mlýna a měřící místa vibrací.

Celkové hodnoty rychlosti vibrací – podle ISO 10 816 – byly na předloze (hřídeli s pastorkem – místa L5 a L6) výrazně zvýšené, dosahovaly až 8 mm/s, přičemž na ostatních měřících místech se pohybovaly v rozmezí 1,5 mm/s až 4,0 mm/s. Při pohledu na FFT a řádová spektra bylo vidět, že příčinou jsou špičky na záběrové frekvenci (ozubení) a jejich harmonické násobky. Zvýšená špička na dvojnásobku záběrové frekvence naznačovala chybu v souososti (rovnoběžnosti) pastorku a věnce, mohlo jít také o kombinaci s dalšími poruchami ozubeného převodu (přesazené poloviny věnce). Nebyly nalezeny příznaky poškození ložisek předlohy. Ve spektru zrychlení byly vybudeny vysokofrekvenční rezonance (FFT zrychlení mezi 6 až 10 kHz) a do 1 kHz byly vidět vysoké špičky na zmíněných záběrových frekvencích. Tento fakt vypovídal o závažnosti poruchy. Cepstrální analýza

Obr. 2 Schéma pohonu mlýna, měřící místa L1-L7



(inverzní Fourierova transformace, užívaná pro odhalení opakujících se harmonických složek ve spektru) potvrdila předchozí závěry – ve spektru se nacházejí harmonické násobky záběrové frekvence a částečně i otáčková frekvence.

## Analýza olejové náplně ložisek a převodovky

Odebrané vzorky mazacích olejů z ložisek hlavní hřídele a z převodovky byly předány na expertizu externí firmě. Výsledky tribologického rozboru lze souhrnně interpretovat tak, že oleje v ložiskách měly vysoké číslo kyselosti, obsahovaly velké množství vody a nečistot. Nečistoty tvořily prachové částice, nebyl přítomen kov. Oleje v převodovce neobsahovaly příliš mnoho nečistot, objevoval se zde drobný kov z opotřebení.

## Analýza stavu ozubeného převodu a ustavení mlýna

Vizuálně bylo zjištěno značné opotřebení ozubeného převodu na obou bocích zubu (záběrová i nezáběrová strana).

Byla změřena excentricita věnce mlýna, její velikost je však závislá na teplotních deformacích způsobených vlivem chladnoucí vsázky v neotáčejícím se mlýnu. Za těchto okolností nebylo možné změřit „počáteční“ (tepelně nezátíženou) excentricitu bubnu. Excentricita pastorku se pohybovala v normě. Za těchto provozních podmínek zřejmě docházelo k záběru excentricky deformovaného věnce s pastorkem a k pěchování zubů do záběru. To způsobilo následnou degradaci ozubených převodů, detekovanou v rámci měření vibrací. V tomto případě zřejmě nebyla správně nastavena vůle v ozubení tak, aby mohly být

kompensovány teplotní změny v průběhu provozu mlýna. Zmíněné pěchování bylo ovšem způsobeno nejen malou provozní vůlí mezi ozubenými koly (zřejmě došlo k seřízení při nevhodné orientaci excentricity věnce), ale i změnou polohy hřídele bubnu v pánvi při rozběhu. V klidu je osa hřídele bubnu „odkloněna ze záběru“ (a v této poloze zřejmě proběhlo seřízení), ale při rozběhu a provozu se střed osy rotace bubnu přimyká k pastorku (o 0,15 mm).

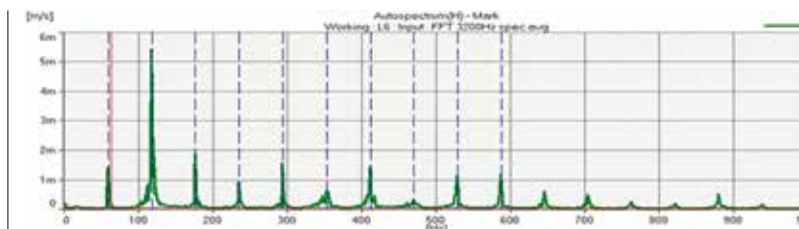
Zmíněné pěchování zřejmě způsobilo i otlacení funkčních ploch ložiskových domků předlohy (ložisko L6 je v domku uloženo s radiální vůlí až 0,1 mm).

Rovnoběžnost os předlohy a věnce byla měřena nepřímou – přes rovnoběžnost zubů pastorku a věnce ve vertikální rovině pomocí přesné elektronické libely. Pastorek byl skloněn v kladném směru a tento sklon fluktoval v rozmezí 0,15 mm/m. Sklon zubů věnce byl proměnlivý, fluktoval v opačných sklonech po 180° natočení až o 0,75 mm/m – hřídel se chovala, jako by byla ohnutá. Tento fakt je zřejmě opět způsoben nerovnoměrnou teplotní deformací bubnu od vsázky a současně také pružnou deformací hřídele od vlastní hmoty válce a vsázky (ta se jednou k teplotně indukovanému prohnutí přičítá a podruhé odečítá, viz obr. 5).

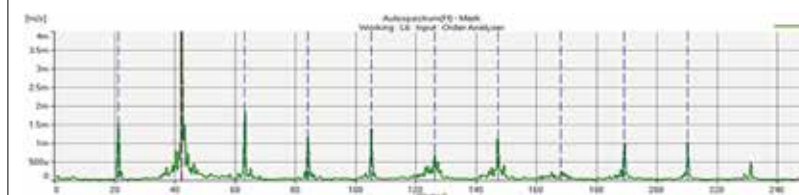
Z výsledků kontroly záběru pomocí tuširovací barvy bylo možno vyvodit, že ke kontaktu dochází pouze na malé části plochy zubu, zato na obou bocích zubu (tedy i na nezáběrové straně, kde by za normálních okolností k dotyku docházet nemělo). Tento nedostatek byl pravděpodobně způsoben nerovnoběžností osy ozubeného věnce a pastorku a zmíněným pěchováním zubů – neexistuje vůle na nezáběrové straně ozubení. Z kontroly záběru navíc vyplývalo, že kromě odchylky rovnoběžnosti os ve svislé rovině se pravděpodobně vyskytuje i výrazná odchylka v rovině vodorovné.

## Doporučené řešení

V rámci ustavování soustrojí jsou „vztáznými rovinami“ záběry ozubení, nikoli osy předlohy a bubnu mlýna. Soustrojí by se tedy mělo ustavit na optimální záběr ozubení. Jako ideální řešení byl doporučen postup seřízení stroje za stabilizovaného teplotního stavu (bez vlivu teploty a vlastní hmoty vsázky) a změření excentricity věnce a průhybu hřídele (nepřímou, na ozubení věnce). Předtím je však ještě třeba změřit excentricitu věnce a průhyb hřídele za nejméně příznivých podmínek při teplotním působení vsázky. Obě



Obr. 3 FFT, rychlost vibrací, RMS, 10Hz-1kHz, [mm/s], měř. místo 6



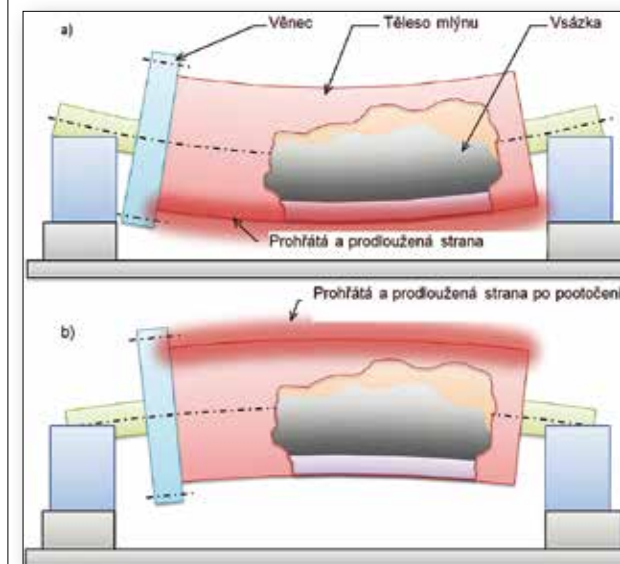
Obr. 4 Řádový analyzátor, rychlost vibrací [mm/s], měř. místo 6

tyto excentricity po sečení tvoří vůli, kterou je třeba v rámci záběru ozubení nastavit.

Pomocí detailní experimentální analýzy kmitání byla úspěšně identifikována příčina vibrací mlýna a bylo možno navrhnout opatření k jejich zamezení. Po ustavení mlýnu podle výše uvedených postupů se vibrace výrazně snížily na přípustnou míru. Mlýn je takto bezproblémově provozován již více jak rok.

Zkušební laboratoř VCSVTT provádí měření vibrací, hluku, teplotního chování, energetické spotřeby a geometrické přesnosti nejen obráběcích strojů již více než 15 let. Od roku 2007 funguje jako akreditovaná zkušební laboratoř.

Více informací a kontakty na autory naleznete na stránkách [www.rcmt.cvut.cz/zkuslab](http://www.rcmt.cvut.cz/zkuslab).



Obr. 5 Znárodnění deformace tělesa mlýna vlivem nerovnoměrného ohřátí a zatížením vsázkou