

Vysoké učení technické v Brně
Brno University of Technology

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

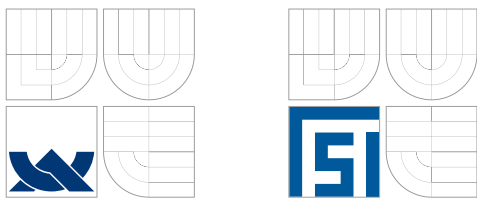
Diagnostický systém pro kontrolu ložisek s využitím metody akustické emise

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Filip Hort**
Author

Brno 2009





Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Diagnostický systém pro kontrolu ložisek s využitím metody akustické emise

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Filip Hort**
Author

Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.**
Supervisor



OBSAH

1	ÚVOD	4
1.1	Historie	4
1.2	Základní princip akustické emise	5
1.3	Aplikace AE v monitorování ložisek	5
2	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	6
2.1	Řešená problematika	6
2.2	Předběžný cíl disertační práce	6
3	SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	7
4	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	46
4.1	Detekce a schopnosti AE při monitorování ložisek	46
4.2	Využití AE během experimentálních zkoušek	46
5	VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	47
5.1	Dílčí cíle disertační práce	47
6	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	48
7	ZÁVĚR	52
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	53
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	55
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56

1 ÚVOD

Akustická emise (AE) je fyzikální jev, při kterém dochází k uvolnění nahromaděné elastické energie v materiálu. Tato energie je vyvolána v důsledku dynamických procesů v materiálu (plastická deformace, únik kapalné nebo plynné látky pod tlakem, tření, koroze, výrobní procesy a jiné...). „Metodou AE nazýváme metodu detekce akustické emise, následně elektronické zpracování detekovaného signálu AE a konečně též vyhodnocení parametrů detekovaného signálu. První systematické práce v této oblasti jsou datovány do 50.tých let 20.tého století a jsou spojeny se jménem německého fyzika Josepha Kaisera.“ [1]

1.1 Historie

Přestože je začátek AE připisován do 50.tých let, první zárodky se zrodily již v roce 1933 při setkání výzkumného institutu o zemětřesení na Univerzitě v Tokiu (Imperial University of Tokyo). V článku vydaném o rok později se popisuje průběh rázů při ohybovém namáhání dřevěných vzorků. Při tomto experimentu se jako snímací čidlo použila jehla vložená do tažné části vzorku, kde byla zaznamenávána závislost změny procházejícího elektrického proudu na oscilografu. Ještě než došlo ke slyšitelnému praskání vzorku, zaznamenal oscilograf neslyšitelné změny vibrací na oscilogramech. Dalším z prvních průkopníků AE byl F. Förster, který roku 1936 provedl měření extrémně malých změn elektrického napětí v závislosti na rozdílném odporu, tyto experimenty prováděl s již sestrojeným elektro/dynamickým senzorem, přeměňujícím mechanické vibrace na elektrické napětí. Pro svoji značnou citlivost byla tyto měření využívána ke sledování mikro-seismické aktivity (Leopard A. Obert). Jak již bylo zmíněno, oficiální začátek historie AE se datuje od roku 1950, kdy Joseph Kaiser publikoval svoji práci na oblast tahového namáhání kovových vzorků se záznamem AE a objevil onu nevratnost, která je nyní známa jako Kaiserův efekt. Během padesátých a šedesátých let dvacátého století se metoda AE zaměřila na zkoumání vlastností nejrůznějších materiálů, zejména se však uplatňovala ve stavebním inženýrství. [2]

První zmínky o aplikaci AE, jako nástroje pro diagnózu ložiska, jsou datovány k roku 1969, kdy Harvey L. Balderston uveřejnil článek nazvaný Detekce počátečního poškození ložisek. Balderston uvedl tři hlavní jevy: zvuk při otáčení, rezonanční frekvence a akustickou emisi. V sedmdesátých letech se utvářel nový detailnější pohled na monitorování stavu ložisek užitím akustické emise, zabývali se jí mnozí výzkumníci, jen pro zmínku například (Ensor a Fong, 1975), kteří AE dávali přednost před analýzami vibračních metod s odůvodněním vyšší efektivity ve vyšších frekvencích (kHz). Další významnou osobností, kdo se podílel na výzkumu zpracování a využití akustické emise byl D. R. Harting (1977,1978). Osmdesátá léta dvacátého století byla věnována zejména zpracování signálu za přispění efektivní počítačové podpory a experimentálním pokusům identifikace změn AE, při vlivu různého druhu mazání a kontaminace maziva ložisek (Elwell, Watanable et al., 1985). [3] [4]

Posledních dvacet let výzkumu v oblasti akustické emise se využívá zejména počítačová podpora matematického zpracování získaných signálů, využití programovacích jazyků a jejich nástaveb, jako je například Matlab a Simulink. Pozadu nezůstává ani vývoj hardwaru, a proto je možné získávat obsáhlejší záznamy s větším množstvím informací o právě probíhajícím experimentu.

1.2 Základní princip akustické emise

Jak již bylo zmíněno AE je fyzikální jev, při kterém se vlivem dynamických procesů uvolňuje elastická energie v materiálu a šíří se jím prostřednictvím přechodových vln. Při přiblížení k povrchu se elastické vlny transformují do různých modů vlnění, které odpovídají dané velikosti a tvaru povrchu součásti. Kolmé složky vln k povrchu součásti vytváří napěťové vlny na povrchu, které je možné detekovat piezoelektrickými snímači akustické emise. Snímač transformuje napěťovou vlnu na elektrický signál (emisní signál), který je dále analogově zpracováván v měřicím a vyhodnocovacím zařízení. Za největší výhodu AE lze považovat detekci aktivních vad v materiálu, to jsou vady, které se projevují při daném zatížení a jsou tedy nestabilní a nebezpečné. Metoda AE také poskytuje pohled na celkový stav měřeného zařízení (zkoušky tlakových nádob). Mezi další výhody patří například možnost kontinuálního monitorování, které má vysokou šanci zaznamenat čas vzniku vady a její rozvoj. Při použití více snímačů je metoda AE schopna poměrně dobře lokalizovat zdroj poruchy, kterou pak lze dále zkoumat jinými defektoskopickými postupy. Výhodou a zároveň i nevýhodou akustické emise je značná citlivost metody. Citlivost k vnějšímu rušení a nutnosti nalezení požadované informace obvykle ve značném šumu okolních provozních zařízení. Velkou nevýhodou, zvláště při opakovaných měřeních s velkou periodou, je jistá unikátnost metody. Nastavení stejných podmínek měření je značně obtížné, mnohdy až nemožné. [1] [5]

1.3 Aplikace AE v monitorování ložisek

V dnešním jednadvacátém století je monitorování základních uzlů rotačních strojních soustav téměř nepostradatelné. V současnosti jsou kladeny vysoké požadavky na stanovení alespoň přibližné prognózy doby do poškození, které může znamenat ohrožení plynulosti provozu, výroby, či dokonce nebezpečnou havárii. Oblastí, ve kterých se používají nedestruktivní metody zkoušení, je celá řada (tlakové zkoušky u nádob s nebezpečným obsahem, mostní ocelové a betonové konstrukce, nebezpečné nosníky, ve výzkumu – například: zkoumání růstu trhlin u destruktivních zkoušek nejrůznějších materiálů, a další).

Monitorování ložisek se využívá u zařízení, ve kterých by výpadek způsobil například značné materiální škody, zastavení provozu výroby, či dokonce zranění nebo usmrcení obsluhy. Cílem monitorování stavu ložisek a ložiskových jednotek je předcházet velkým opravám, výměně celých zařízení a zejména získávání informací o průběžném stavu zařízení, pomocí nichž lze naplánovat případné odstávky a preventivní údržbu.

Jako příklad lze uvést monitorování ložisek velkých parních turbín, vyskytujících se v energetickém průmyslu. Pokud hovoříme o použití při výrobě elektrické energie, jedním z možných uplatnění je i monitorování stavu větrných elektráren, kde se využívá bezdemontážní diagnostiky a přenos získaných informací do záznamového vyhodnocovacího centra je zajištěn telekomunikační technikou. Jedním z netradičních použití může být využití diagnostiky u turbín proudových letounů. [6]

Akustická emise vzniká jako odezva na vznikající dynamické procesy emitované ve vysokofrekvenční oblasti. Symptomy poškození jsou často skryty mezi ostatní odezvou stroje (dynamiku rotoru, strukturní a okolní elementy a dokonce i šum elektrického vedení). Úspěšná detekce poškození spočívá v nalezení parametrů signálu, které se mění vlivem dynamických procesů vyvolaných rozvíjejícím se poškozením.[7]

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

2.1 Řešená problematika

Diagnostika ložisek obsahuje poměrně široké spektrum možností měřicích metod (termografická měření, vířivé proudy, vibrační metody a jiné). Diagnostickými metodami a postupy je možné stanovit případné poškození sledovaného subjektu, v našem případě ložiska. Vymezení problematiky disertační práce se týká použití AE jako nástroje pro identifikaci počátku vzniku a rozvoje kontaktního poškození radiálních ložisek. Pomocí této nedestruktivní metody lze odhalit vznikající poškození dříve, než je tomu u ostatních používaných metod měření. Pro možnost porovnání a doplnění sledované frekvenční oblasti je problematika rozšířena i na oblast monitorování vibrací.

2.2 Předběžný cíl disertační práce

Jak již název disertační práce napovídá, předběžným cílem je sestavit specifický systém monitorování a vyhodnocování radiálních ložisek pro zjišťování stupně poškození metodou akustické emise. Reálným systémem výstupu je pak soustava několika dílčích prvků: modifikace experimentální stanice SA 67 s umístěním vlnovodů a snímacích čidel. Zvolení vhodné měřicí aparatury se softwarem pro AE a vibrační měření. Výstupem by mělo být nalezení parametru AE, který by co nejlépe charakterizoval vznikající poškození a doplnil tak metodiku aplikace AE pro klasické trvanlivostní zkoušky ložisek. Tento parametr by mohl být aplikovaný do jednoduššího měřicího zařízení pro trvanlivostní zkoušky ložisek v provozu. Možným doplněním cíle práce by mohlo být hodnocení ložisek pro různé stupně mazání.

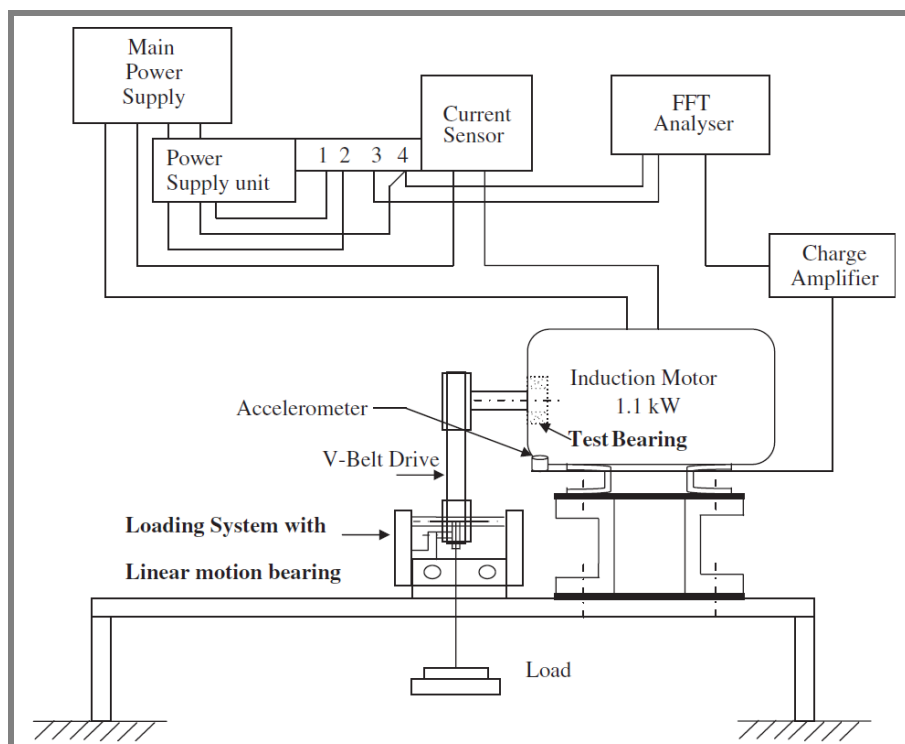
3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

TANDON, N., YADAVA, G.S., RAMAKRISHNA, K.M.: A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings. In: MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, Volume: 21, Issue:1, Pages: 244-256, ITMME Centre, New Delphi, INDE, 2005, ISSN 0888-3270.

Odborný článek je věnován několika metodám monitorování stavu valivého ložiska indukčního motoru, jako kritické komponenty s následným porovnáním použitých metod. Autoři zde uvádějí tyto monitorovací techniky: monitorování vibrací, satorové harmonické proudy, akustickou emisi (AE) a metodu rázových pulsů (SPM). Projevy technik byly pozorovány na defektu dráhy vnějšího kroužku ložiska. Experiment byl proveden s různými stupni zatížení pro všechny použité monitorovací techniky a záznamy byly posléze porovnány.

Experiment

Obrázek 1 zobrazuje použitou měřicí aparaturu. Mezi nejdůležitější položky patří jednofázový indukční motor s výkonem 1,1 kW a otáčkami 1440 ot/min, zatěžovaný přes klínový řemen stanovenou zátěží. Motor je uchycen k základové desce přes dva pružné listy, přes které se motor ani základ vibračně neovlivňují. Testované kuličkové ložisko s označením 6205 bylo před testovací procedurou řádně vyčištěno technickým benzinem a následně acetonem pro odstranění všech zbytků průmyslového maziva. Po vyčištění následovala aplikace 4 g SKF maziva. Snímače měření vibrací, AE a SPM byly upevněny v oblasti uložení ložiska a zároveň nejvyššího zatížení na kraji motoru.



Obr. 1 Schematický diagram testovací výbavy.

Měřicí vybavení

Pro monitorování vibrací byly použity piezoelektrické akcelerometry Brüel & Kjaer (B&K) typ 4366 napájený netlumenou vlastní frekvencí 39 kHz. Výstup akcelerometru byl posilován zesilovačem stejné firmy označeném jako 2635 napojeným na přenosný Fourierův analyzátor Ono Sokki CF 3200.

Měření harmonických proudů probíhalo při sériovém napojení na napájecí napětí. Proudové čidlo pracuje v Hallově efektu, při kterém Hallův element umístěný ve vzduchové mezeře magnetického toku přeměňuje magnetické pole generované primárním proudem do úměrného Hallova napětí. Následné zesílení dorovnáva velikost Hallova napětí na primární napětí. Proudový senzor je napájen 15V z proudové jednotky po dobu 15 minut před začátkem měření. Jednofázový indukční motor byl snímán senzory typu LEM-HY 25P zapojených v sérii.

Akustická emise byla snímána ve spolupráci se společností zabývající se měřením AE (AET), snímači AET AC 375L s rezonanční frekvencí 375 kHz, zesílením 60 dB (AET 160B) a filtrem (AET FL 25x) s propustností 250 – 500 kHz. Snímače byly upevněny na krytu testovaného ložiska přes vazební prostředí adhezivní páskou. Z předzesilovačů napájených 12 V DC napětí byl zásoben Tektronix TDS 210 digitální osciloskop reálného času, který dokáže poskytnout frekvenční spektrum.

Rázové pulsy byly pozorovány zařízením T200 Švédské firmy SPM AB a snímány přenosovým snímačem SPM 10777. Přenosová sonda byla stlačena přímo v zóně maximální zátěže na krytu ložiska k docílení maximálních rázových pulsů.

Podmínky měření

Měření probíhala od nulové zátěže až do plného zatížení (27 kg) po přídavku 5 kg a s posledním přidáním 2 kg. Otáčky motoru byly konstantní 14400 ot/min a pro porovnávací zkoušky byly použity tři zdravá (nepoužitá) ložiska a z nich vypočtený průměr pro každou techniku měření. Defekt dráhy vnějšího kroužku byl vytvořen metodou elektrojiskrového obrábění. Defekt měl tvar kruhové díry s průměrem od 250 do 1500 μm , s krokem 250 μm postupně po každém proběhlém měření a konstantní hloubkou 2500 μm .

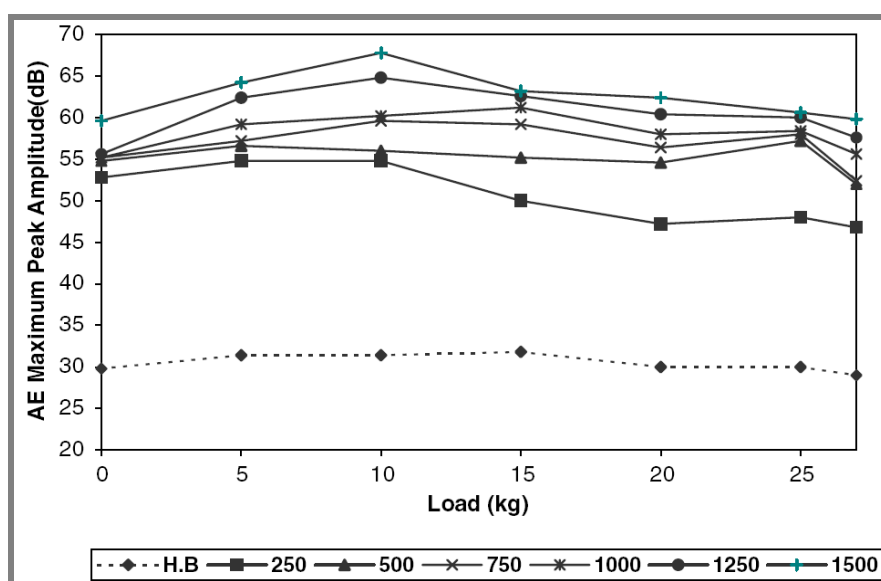
Výsledky a diskuze

Měření vibrační rychlosti testovaného ložiska s defektem a bez defektu prokázalo velký rozdíl hodnot do velikosti defektu 500 μm při stanovené zátěži 15 kg. Dalším zvětšováním průměru defektu již nebyla relativní změna tak markantní. Při sledování spektra vibračního signálu v nízkofrekvenčním rozsahu byly pozorovány špičky od vypočtené otáčkové frekvence motoru (24 Hz), vypočtené frekvence defektu dráhy a byla objevena i významná špička dvojnásobku napájecí síťové frekvence 50 Hz. Každé elektrické zařízení napájené 50 Hz může vlivem mechanického nevyvážení (vznikem a zánikem magnetického pole v železných vrstvách motoru) produkovat mechanické vibrace rovné dvojnásobku síťové frekvence (f_e). Měření prokázalo zvýšení hodnoty rychlosti vibrací na frekvenci defektu 84,15 Hz ze zdravého ložiska 0,39 mm/s do konečného poškození 1500 μm na hodnotu 1,31 mm/s a to bez výraznější změny v oblasti ostatních frekvencí.

Měření harmonických statorových proudů probíhalo za stejných podmínek jako ostatní měření. Největší amplitudový skok harmonického statorového proudu nastal už při prvním poškození 250 μm , dalším zvětšováním defektu byly relativní změny poměrně nízké a k dalšímu razantnějšímu nárůstu (až o 39,97 %) došlo až při finálním poškození o velikosti 1500 μm . Vzájemný vztah mezi vibracemi poškozeného ložiska a spektrem harmonického proudu je dán mechanickým radiálním posunutím rotoru motoru a tím vzniku anomálií v hustotě toku mezerou mezi státorem a rotorem. Ložiskové chyby mohou způsobit dva typy excentricity rotoru, prvním typem je statická excentricita, při které je rotor posunut ze středu statorového vrtání, ale stále se otáčí ve své vlastní ose. Druhým typem je dynamická excentricita rotoru, kdy se rotor otáčí ve středu statorového vrtání, ale ne ve vlastní ose rotoru. Oba typy excentricity vyvolávají nadměrné mechanické napínání stroje a zvýšené opotřebení ložiska. Dále je dokázáno, že vibrační frekvence se samy odrážejí v napěťovém spektru jako f_{bng} viz (1), kde f_e je elektrická napájecí frekvence, $m=1..3$ a f_v je jedna z charakteristických vibračních frekvencí. Kombinací s vibračním měřením je tedy možné dopočítat f_{bng} pro $f_e=50$ Hz a $f_v=84,15$ Hz jako 34,15 Hz a 134,15 Hz. Celkový nárůst amplitudy mezi zdravým ložiskem a ložiskem s maximálním defektem je pro 34,15 Hz 0,003565 a 0,0426 a pro 134,15 Hz 0,0004979 a 0,0353. V celkovém spektru však nejsou tyto frekvence nijak zvláště výrazné a značně je překračují harmonické frekvence napájení 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz...

$$\text{Rovnice (1): } f_{bng} = [f_e \pm mf_e]$$

Monitorování akustickou emisí probíhalo současně s ostatními technikami měření od nulové zátěže až do plného zatížení. Obrázek 2 popisuje průběh špičkových amplitud AE pro definované velikosti defektu v závislosti na zvyšování zatížení. Rozdíl zdravého ložiska a ložiska s maximálním defektem je velice značný, například pro maximální defekt při 10 kg zátěži je oproti zdravému ložisku nárůst zhruba o 116 % a při 15 kg zátěži 98 %. Z tohoto pozorování je patrné že akustická emise je schopna zaznamenat zvýšené emisní události již při prvních známkách poškození ložiska.

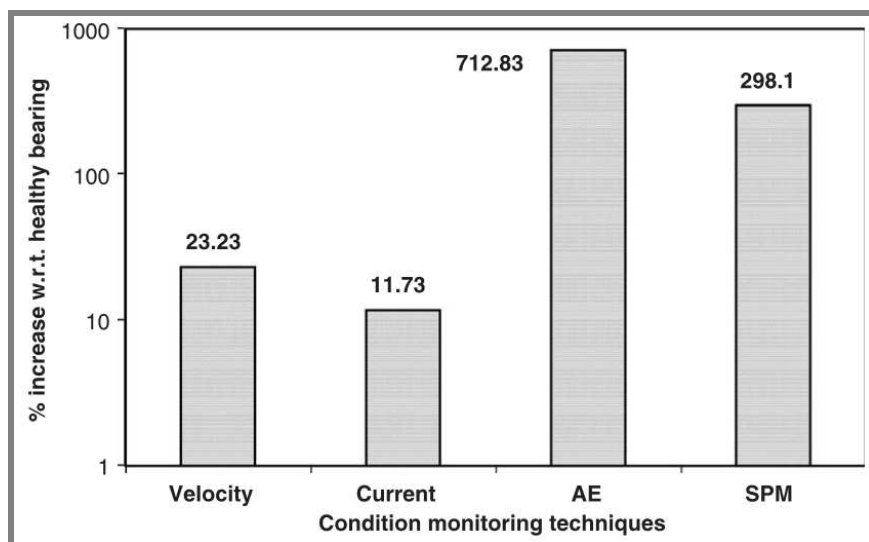


Obr. 2 Špičky amplitud akustické emise s defektem dráhy vnějšího kroužku.

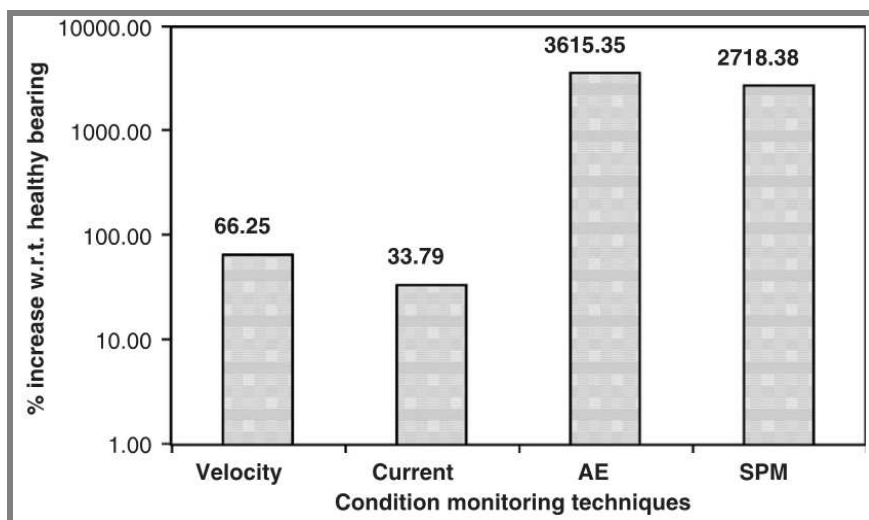
Monitorování metodou rázových pulsů ukázalo výrazné zvýšení maximální normalizované hodnoty dBm (0 dB=1 mW) až od velikosti defektu 750 μ m. K neutralizování efektu valivé rychlosti na měřené hodnotě byl použit rotační hřídel o průměru 25 mm a otáčkách 1440 ot/min.

Porovnání technik

Porovnání různých technik monitorování poškození použitých při experimentu pro různé stupně poškození a zatížení ukazuje obr. 3 a 4, kde je procentuální zvýšení odezvy poškozeného ložiska s respektováním průměrné hodnoty zdravého ložiska. Jak ukazují grafy na obr. 3 a 4, nejvyšší podíl je vždy u metody AE, následované metodou SPM, měření rychlosti vibrací a satorovými proudy je na místě třetím, respektive čtvrtém. Ačkoliv metoda měření satorovými proudy vyšla až jako nejméně efektivní, má tato metoda minimální požadavky na vybavení a někdy je též označována jako bez-senzorová metoda.



Obr. 3 Porovnání monitorovacích technik pro minimální velikost defektu.



Obr. 4 Porovnání monitorovacích technik pro maximální velikost defektu.

Závěr

Pro simulované defekty ložiska indukčního motoru jsou metody měření rychlosti vibrací a harmonickými statorovými proudy poměrně úspěšné. Zvýšení měřené odezvy v závislosti na velikosti defektu bylo u obou monitorovacích technik zhruba trojnásobné. Cenově nejefektivnější metodou ze všech čtyř použitých technik je měření harmonických statorových proudů. Nejefektivnější metoda použitá při experimentu byla metoda akustické emise, která vzhledem ke zdravému ložisku měla nejvyšší zvýšení relativní odezvy pro počáteční i koncovou velikost defektu. Metoda SPM se ukázala jako druhá nejefektivnější a při porovnání počáteční a koncové velikosti defektu prokázala nejvyšší zvýšení až devítinásobné (2718 / 298).

Poznatky pro Disertační práci

Prostudovaný článek poskytuje názorné srovnání několika typů různých měření včetně metody akustické emise v identifikaci poškození vnější dráhy valivého kuličkového ložiska. Defekt dráhy byl vytvořen uměle a jeho velikost precizně měněna elektrojiskrovým obráběním. Poloha a uchycení snímačů, zvláště AE, dokazuje použitelnost metody při detekci poškození nejen přímým kontaktem – například použitím vlnovodu, ale detekcí poruchy i z povrchu konstrukce, v tomto případě krytu motoru. Dalším důležitým poznatkem po práci na disertační práci je příprava ložisek, testovaná ložiska byla důkladně zbavena průmyslového maziva a do každého bylo aplikováno 4 g SKF maziva. Článek je zaměřen na srovnání různých technik monitorování poškození, z nich pro disertační práci je nejdůležitější akustická emise a monitorování vibrací. Důležitým poznatkem je výskyt zvýšených vibrací na dvojnásobku otáčkové frekvence motoru v důsledku mechanického nevyvážení statoru. Testovací měření mohlo být ještě doplněno snímáním teploty v blízkosti ložiska.

HOLROYD, T., J.: Acoustic Emission as a basis for the condition monitoring of industrial machinery. Pages: 8, HOLROYD INSTRUMENTS LTD., Matlock, DE4 2AJ, UK, online: 25.6.2009 <http://www.holroyd-instruments.co.uk/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/paper.pdf>.

Článek popisuje aplikaci akustické emise (AE) při sledování stavu strojního zařízení za účelem identifikace poškození ve velmi ranném stádiu vzniku. Tímto sledováním a odhalením prvních známek poškození se mohou snížit náklady na údržbu a souběžně dochází k ochraně poškození jiných součástí zařízení, na které má šíření vady negativní vliv. Článek obsahuje jedinečné možnosti AE při monitorování rotačních strojů.

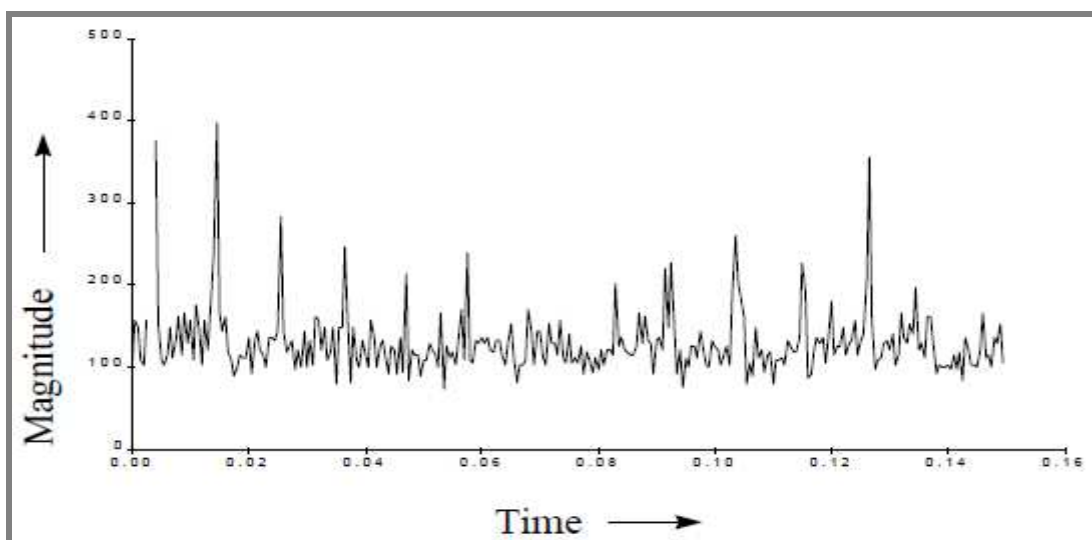
Důležitým krokem před měřením strukturních, či jiných změn materiálu, je co nejvhodnější volba detekovaného frekvenčního pásma a právě tomu odpovídající zohlednění použité aparatury. Při volbě příliš nízké frekvenční detekce signálu oproti zdroji může dojít k nárůstu šumu okolí a rezonanční frekvence mají významný efekt na detekované zesílení signálu. Na druhou stranu při volbě příliš vysoké frekvence detekce signálu se nemusí nízký zdroj vůbec podařit rozlišit. Výstupní signál ze senzorů AE může být v základu zpracováván jako obálka signálu, nebo formou standardních parametrů.

Experiment

Jednou z řešených problematik článku je monitorování stavu poškozeného ložiska metodou AE s různými metodami jeho vyhodnocení. Ložiska byla různých typů s uměle vytvořeným poškozením a byla testována při různých provozních podmínkách (otáčky, zatížení). Obálky signálu obsahovaly záznam v délce trvání 0,6 s s rozlišením 0,5 ms pro 1125 různých podmínek sledování.

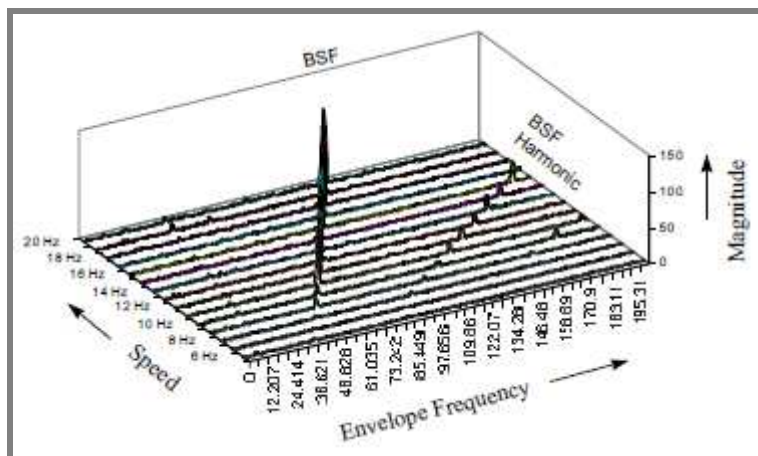
Výsledky a diskuze

Defekty vytvořené v ložisku vytvářejí rázy detekovatelné snímačem AE. Obr. 5 zobrazuje průběh napěťových pulsů s časovou periodou 11 ms, která koresponduje s vypočtenou frekvencí defektu 91 Hz vnitřního kroužku ložiska.



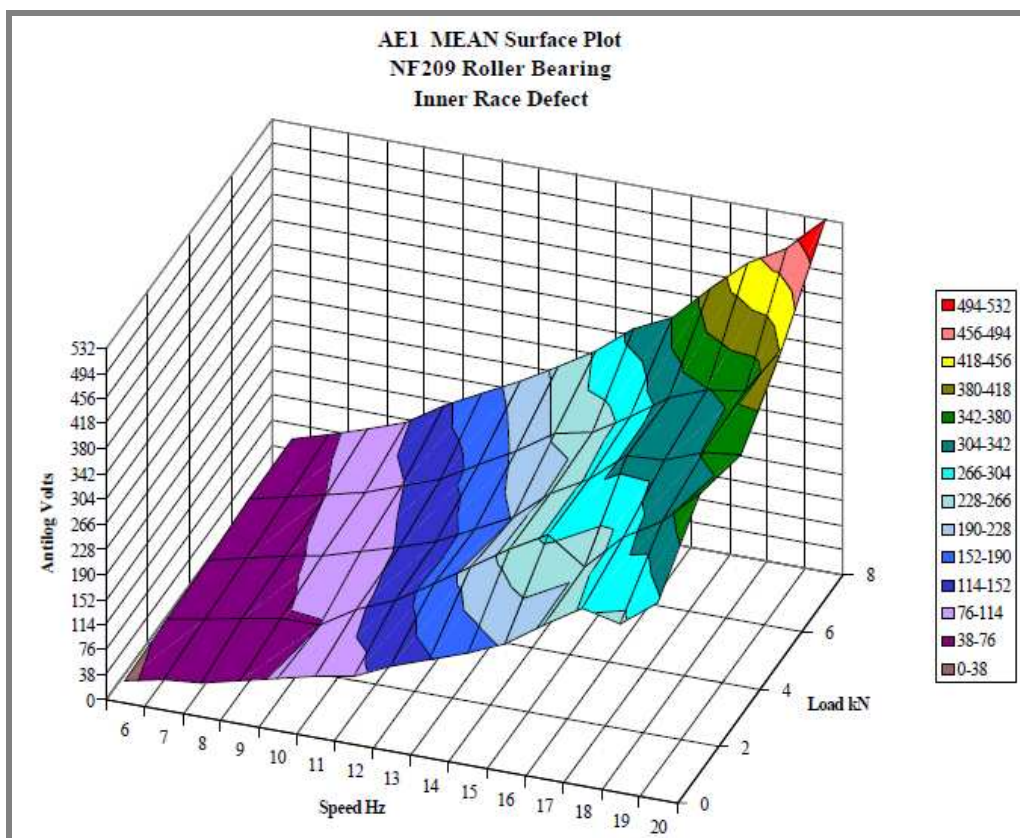
Obr. 5 Záznam napěťových pulsů z defektu dráhy vnitřního kroužku ložiska.

Jedním z možných způsobů sledování a vyhodnocování poškození je zobrazení poškození ve frekvenční oblasti. Obr. 6 ukazuje jeden ze způsobů možných zobrazení a to ve formě 3D grafu, kde jednotlivé osy reprezentují zesílení, rychlost otáčení a frekvenční obálku spektra. Poškození, pro které jsou viditelné i jeho harmonické složky, je vypočtené jako defekt na valivém tělese ložiska.



Obr. 6 Graf obálky AE spektra pro valivé ložisko.

Dalším možným zobrazením AE ve formě celkového pohledu na signál, či střední hladinu signálu popisuje obr. 7, získaná data jsou naměřena s defektem na vnitřním kroužku valivého ložiska. Defekt způsobuje špičkové hodnoty v ploše grafu.

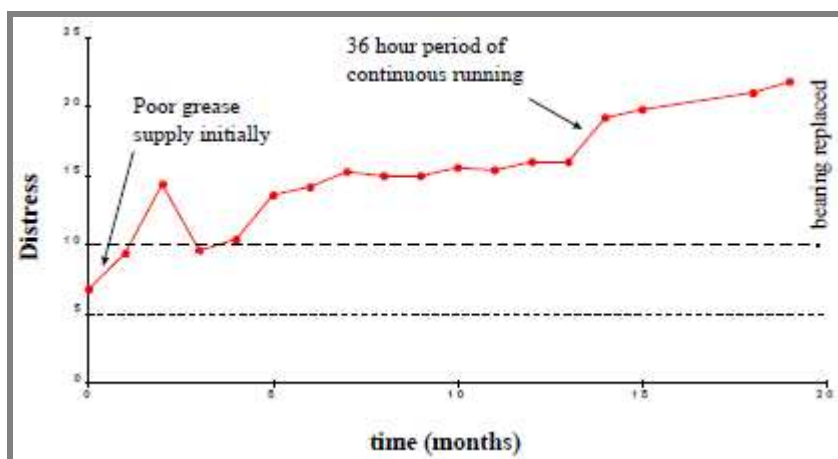


Obr. 7 Závislost velikosti zatížení a rychlosti otáčení na střední hodnotě signálu AE.

Z porovnání grafů na obr. 5 a 7 je možné konstatovat, že střední hodnota odráží menší amplitudy signálu při rázových pulsech, avšak je velmi citlivá na průběžné (trvalé) zdroje, jako je například opotřebením třením. V praktických podmínkách měření je však úroveň signálu poměrně vhodným parametrem, který může charakterizovat trend vývoje poškození a je dobře porovnatelný se staršími záznamy měřeními za podobných podmínek. Přístup FFT je pro pouhou otázku poškození značně komplikován, pro tento účel je vhodnější využít časové oblasti zpracování signálu. Parametr Dristress®, který je registrovaným parametrem Holroyd Instrument, dokáže celkem rychle odhalit vznikající poškození, a to v časové oblasti, která je méně náročná na zpracování.

Průmyslové aplikace

V dalším textu se článek zabývá aplikací AE v průmyslu při použití zejména aparatury zaznamenávající parametr Dristress®. Použití této aparatury se využívá zejména při monitorování motorů, převodovek a hřídelů s ložisky. Obr. 8 zobrazuje záznam z měření ložiska ve šroubovém čerpadlu, které bylo během prvních dvou měsíců špatně mazané, po napravení podmínek mazání se hodnota Dristress® dostala zpět pod mezní hranici 10. Nicméně vzniklé poškození již bylo tak značné, že ložisko vykazovalo stále rostoucí hodnoty AE. Po osmnácti měsících jej bylo nutné vyměnit.



Obr. 8 Záznam AE ložiska šroubového čerpadla.

Závěr

Článek ukázal na věrohodnost aktivity AE detekované z faktorů ovlivňujících provoz monitorovaných zařízení, jako jsou vytvořená poškození, různé provozní otáčky, či aplikované zatížení v místě kontaktu. Aplikace AE byla ověřena na celé řadě průmyslových zařízení v provozních podmínkách a ze zkušeností je patrné, že se výhodně využívá standardizovaných měřicích parametrů a postupů, které lze v rámci měřicích period porovnávat a usuzovat tak na případné postupné zhoršení stavu zařízení (ložiska).

AE má pro svoji vyšší citlivost (i v rámci časové oblasti snímání) lepší předpoklady odhalit vznikající poškození dříve a jednodušeji, než vibrační postupy, u kterých je důležitým zohledněním identifikace vzniku poškození frekvenční analýza. Nicméně, ať už jako doplnění, či základ monitorování stavu zařízení, je vyžadující

i monitorování vibrací, a to například pokud zdroj poruchy generuje nízkofrekvenční vlnění (například při nevyvážení rotačních součástí).

Poznatky pro Disertační práci

Akustická emise je poměrně snadno aplikovatelná na monitorování široké škály strojních zařízení, zvláště v momentě standardizovaného nastavení citlivosti AE na určitý specifický parametr. Ve společnosti Holroyd Instrument využívají převážně parametr s vlastní ochrannou známkou nazvaný Dristress®, který je citlivý na rozvíjející se poškození v časové oblasti měření. Tato informace je důležitá pro řešení disertační práce, že existují parametry v časové oblasti měření, které dokáží citlivěji reagovat na rozvíjející se poškození, než nejčastěji užívaná střední hodnota signálu RMS.

ORHAN, S., AKTÜRK, N., VELIK, V.: Vibration monitoring for detect diagnosis of rolling elements bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies. In: NDT&E International 39, Pages: 293 – 298, 2006.

Článek pojednává o monitorování vibrací na strojích užívaných u naftových rafinérií. Společně s monitorováním hladiny vibrací byly vyhodnocovány i spektrální analýzy vibračního signálu. Článek obsahuje tři případové studie získané při provozu v reálných provozních podmínkách.

Frekvenční defekty ložisek s valivými elementy

Defekt valivého elementu ložiska je charakteristický určitými frekvencemi, které jsou závislé na: geometrii valivého elementu, počtu elementů a otáčkách hřídele. Tyto frekvence lze vypočítat z rovnice (2) až (5).

$$\text{Rovnice (2):} \quad W_c = \frac{n}{2} \left[1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right]$$

$$\text{Rovnice (3):} \quad W_b = \frac{n}{2} \left(\frac{d}{D} \right) \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2(\alpha) \right]$$

$$\text{Rovnice (4):} \quad W_{bp} = \frac{n}{2} N_b \left[1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right]$$

$$\text{Rovnice (5):} \quad W_{bpi} = \frac{n}{2} N_b \left[1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right]$$

kde: n [ot.s⁻¹] - rychlost otáčení hřídele
 N_b [-] - počet valivých elementů
 α [°] - kontaktní úhel
 d [mm] - průměr valivých elementů
 D [mm] - roztečný průměr valivých elementů v ložisku
 W_c [Hz] - frekvence defektu klece
 W_b [Hz] - frekvence defektu valivého elementu
 W_{bp} [Hz] - frekvence defektu vnějšího kroužku
 W_{bpi} [Hz] - frekvence defektu vnitřního kroužku

Měřicí vybavení

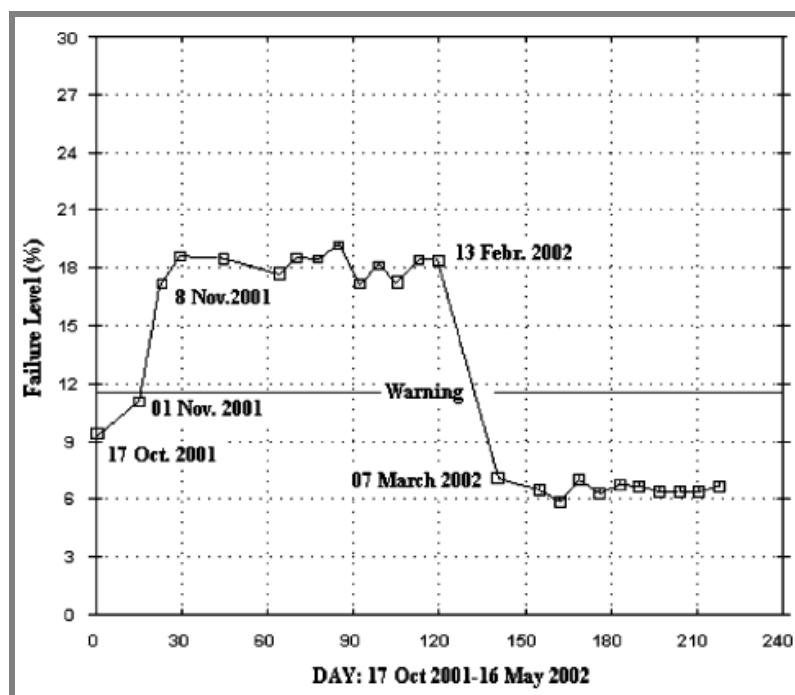
Během experimentu byl použit analyzátor CSI 2110 a akcelerometry CSI 350 s citlivostí 0,1 V/EU. Pro případovou studii I bylo použito odstředivé čerpadlo s devíti lopatkami a motorem o výkonu 160 kW a otáčkami 2975 ot/min. Pro případovou studii II bylo testováno ložisko ventilátoru SKF NU 224 s výkonem ventilátoru 345 kW a otáčkami 741 ot/min. Ve třetím případě bylo použito ložisko SKF 6222 na ventilátoru s výkonem 200 kW a otáčkami 985 ot/min.

Měřicí podmínky

Vibrace byly měřeny v axiálním, horizontálním i vertikálním směru. Pro každou případovou studii platily specifické podmínky a způsob vyhodnocování.

Výsledky a diskuze

Případová studie I: Obr. 9 zobrazuje průběh záznamu od prvního měření tj. 17.10.2001 do 16.5.2002. Z průběhu záznamu je jasně patrné poškození ložiska během prvního měsíce od začátku měření. Porovnáním vypočtených chybových frekvencí (frekvencí defektu) s naměřeným frekvenčním spektrem signálu se nejvíce projevovala oblast s valivými elementy (tabulka 1). Následovalo ustálení stavu až do 13.2.2002, kdy byla naplánována odstávka čerpadla. Po vymontování a zjištění stavu ložiska byla nalezena koroze na vnějším kroužku v místě uložení (obr. 10). Vzniklá vůle v uložení patrně způsobovala zvýšené hladiny vibrační valivých elementů. Po namontování nového ložiska se vibrace ustálily do normálních hodnot.



Obr. 9 Celkový trend vibrační hladiny ložiska čerpadla.

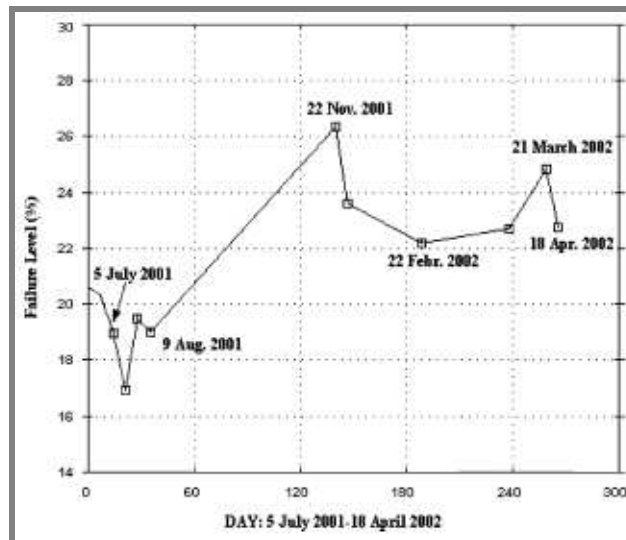


Obr. 10 Koroze na vnějším kroužku ložiska.

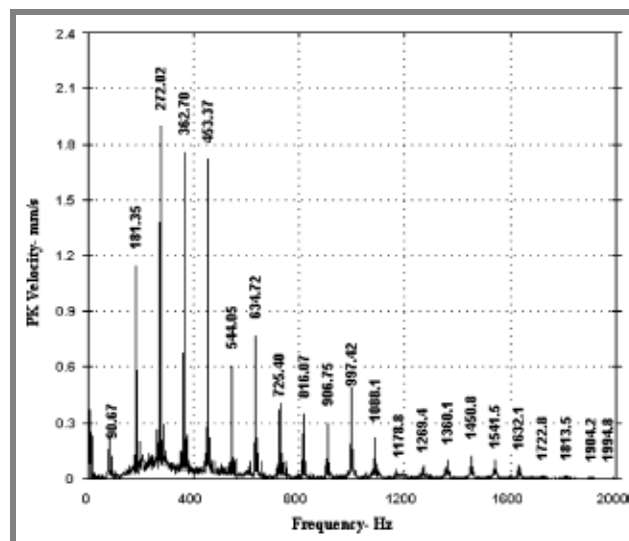
Případová studie II: Zde se sledovalo ložisko SKF NU 224 válečkový typ. První záznam byl pořízen 20.7.2001 (obr. 11), během dalších čtyř měsíců se zvýšila hladina vibrační a provedené frekvenční analýzy poukazyvaly na defekt vnějšího kroužku. V naměřeném záznamu lze identifikovat vypočtené frekvence defektu viz. tab. 1 a charakteristické násobky frekvence defektu (obr. 12).

Tab. 1 Vypočtené frekvence poškození testovaných ložisek.

Bearing type	Shaft speed (Hz)	N_b	w_c (Hz)	w_b (Hz)	w_{bp} (Hz)	w_{bpi} (Hz)
SKF NU 224	12.35	17	5.385	43	91.55	122.14
SKF 6222	16.41	10	6.78	43.56	67.82	98.48



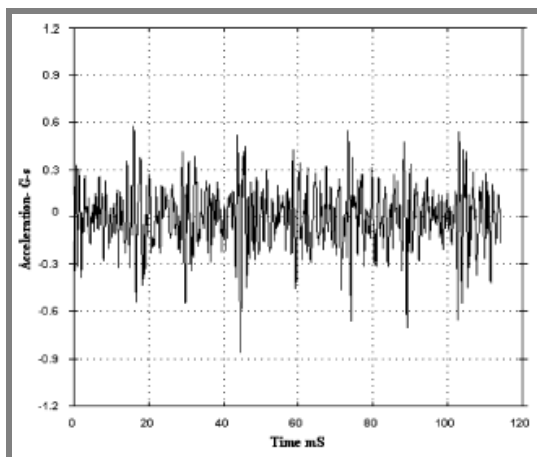
Obr. 11 Celkový trend vibrační hladiny ložiska SKF NU 224.



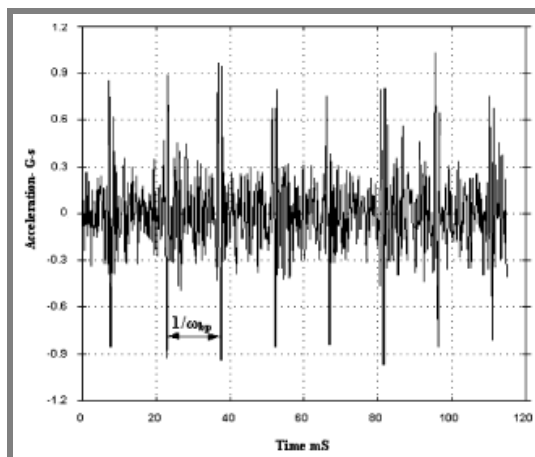
Obr. 12 Frekvenční spektrum se špičkou 90,67 Hz a jejími násobky.

Další průběh zvýšených vibračních hodnot vyžaduje důsledné monitorování a zabránění tak havarijnímu stavu (‘kousnutí‘, destrukci ložiska).

Případová studie III: Třetí případová studie se zabývá monitorováním kuličkového ložiska SKF 6222, sledovaného jeden celý rok a to od 6. 9. 2001 do 11.9.2002. Obr. 13 a obr.14 ukazují změnu v časovém průběhu špiček vibračního zrychlení ze začátku měření (3.10 2001) a z konce měření (6.7.2002). Již na první pohled je zřejmý nárůst špiček z konce měření.



Obr. 13 Vibrační signál z 3.10.2001.



Obr. 14 Vibrační signál z 11.10.2002.

Závěr

V článku byly použity techniky vibračního monitorování kuličkových a válečkových ložisek pro možnost hodnocení poškození a využití jako nástroje pro naplánování odstávky zařízení a oddálení drahých údržbových prací (finanční úspora). Byly vypočteny a experimentálně ověřeny frekvence defektů vznikajících na ložiscích. Také se ověřilo uhlazení a samo-zpevnění ložiskových vad. Při pravidelných kontrolách lze vibračními metodami předejít případné havárii zařízení.

Poznatky pro disertační práci

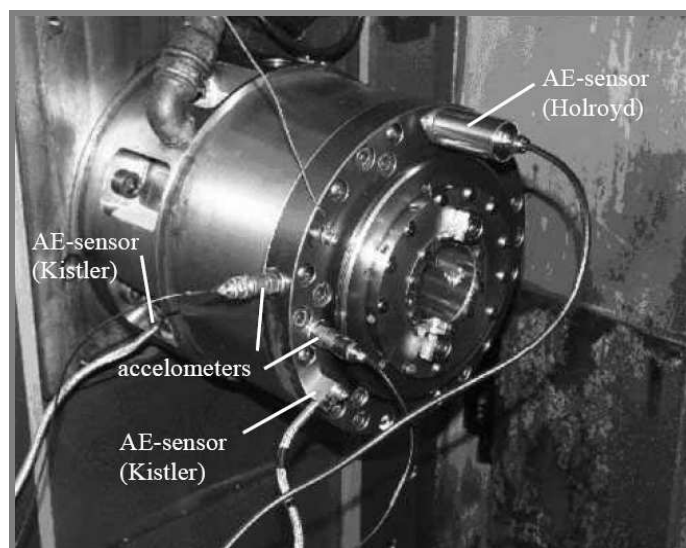
Disertační práce bude obsahovat kromě zpracované metodiky AE také hodnocení stavu ložisek vibračními metodami. Autoři článku dokázali poměrně přesně identifikovat odezvu poškození ve frekvenčním spektru za pomoci porovnání s vypočtenými hodnotami. Podobný přístup bude rozebrán i v disertační práci.

RUUSKA, M., ANDERSON. P.H.: Spindle bearing monitoring using acoustic emission. In: XVII IMEKO WORLD CONGRES PROCEEDINGS, Pages: 2164 – 2167, Dubrovnik, CROATIA, 2003.

Článek popisuje systém monitorování ložiska vřetene NC obráběcího centra snímáním akustické emise a vibračními metodami. Při experimentálním zkoušení byl proveden velký počet testů s různým stupněm zatížení, otáčkami a vhodně umístěnými senzory. Měření byla provedena v provozu celkem devětkrát s šesti týdenními intervaly.

Experiment

Cílem výzkumu bylo odhalit možné monitorovací podmínky pro NC obráběcí centra, konkrétně na tělese vřetene a v odstupňovaných otáčkách. Pro měření byly použity snímače AE a vibrační akcelerometry umístěné v různých polohách vřetene viz obr. 15. Uchytení snímačů ani monitorovací technika nijak neomezovaly produkci centra.



Obr. 15 Vřeteno obráběcího centra s použitými snímači.

Měřicí vybavení

Horizontální obráběcí centrum Burkhardt&Weber. AE senzory (Kistler, Holroyd) s analyzátozem APU firmy Holroyd Instruments. Dva akcelerometry (horizontální i vertikální poloha snímání). Analyzátor vibračního signálu Fulcrum DT 3818 s integrovaným DSP procesorem, umožňujícím online sledování FFT analýz.

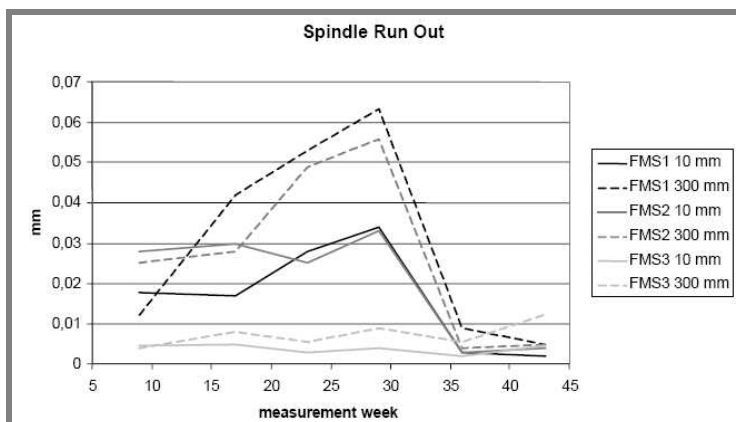
Podmínky měření

Měření probíhala ve třech otáčkových režimech (50, 500 a 2000 ot/min). Monitorování AE bylo sledováno parametrem RMS, vibrační signál byl zaznamenáván pro frekvenční rozsah 50 Hz – 15 kHz s vzorkovací frekvencí 30 kHz.

Výsledky a diskuze

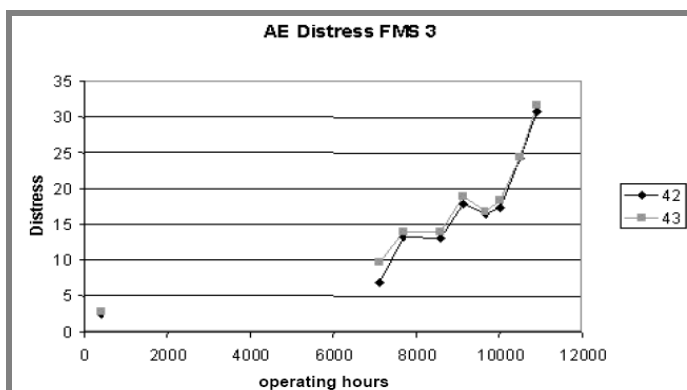
Vřeteno bylo průběžně monitorováno na excentricitu během provozu a to ve dvou místech čela vzdálených 10mm a 1300 mm. V tomto případě byly sledovány tři

vřetena, první dvě nebyly s ložisky měněny několik let, třetí pracovalo prozatím jen 18 měsíců. Graf z tohoto měření je zobrazen na obr. 16.

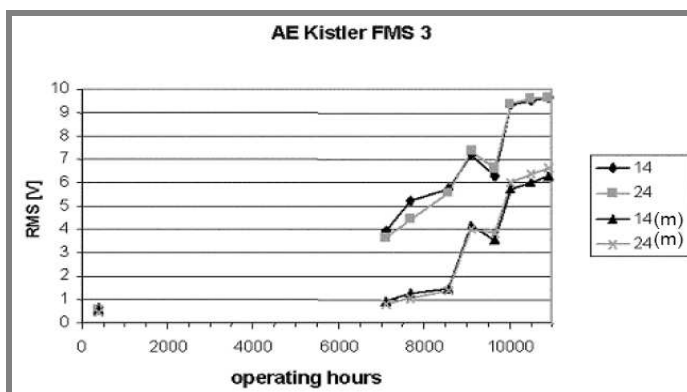


Obr. 16 Naměřená excentricita na třech vřetenech.

Dalším monitorováním bylo monitorování odezvy AE parametrem Dristress® pro dva rozdílné převody (42 = 1. převod, 43 = 2. převod) s velikostí otáček 500 ot/min, viz obr. 17. Druhý parametr v oblasti monitorování AE byla střední kvadratická hodnota signálu – RMS, která je zobrazena na obr. 18, pro různé provozní podmínky s otáčkami 2000 ot/min (14 = bez vyvažovacích nástrojů, 24 = s vyvažováním, m = střední hodnota).

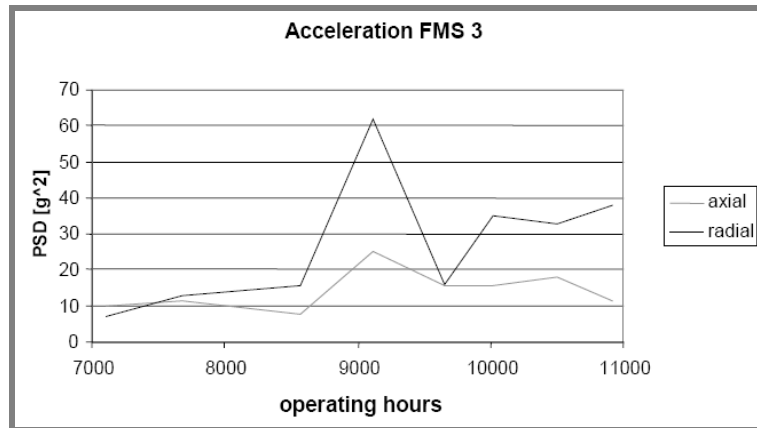


Obr. 17 Záznam AE Dristress® pro dva převody při 500 ot/min.



Obr. 18 Záznam AE RMS pro vyvážené a nevyvážené podmínky.

Záznam z měření vibračního zrychlení je na obr. 19, kde je záznam jak z axiálního, tak radiálního směru. V grafu je patrný defekt kolem 9000 hodiny provozu, po kterém pravděpodobně došlo k uhlazení poškození a pokračování ve stabilním růstu vibrační hladiny zrychlení.



Obr. 19 Záznam vibračního zrychlení v axiálním i radiálním směru měření.

Závěr

Měření probíhalo v reálných provozních podmínkách, přičemž dosažené výsledky ukazují na vhodnější použitelnost právě akustické emise před vibračními metodami. Úspěšná aplikace monitorování AE včetně NC stroje dovozuje použití i u jiných typů obráběcích strojů a strojních uzlů, jako jsou například pohybové šrouby. Z uvedených výsledků je zřejmé, že monitorování vyosení včetně není nejvhodnější metodou pro diagnostiku včetně ložiska. Na základě výsledků je doporučeno umístění stálého monitorovacího zařízení, pro hlídání klíčových prvků procesu výroby.

Poznatky pro Disertační práci

Článek lze v první řadě vytknout neuvedení několika popisů dějů v získaných záznamech, jako například v grafu na obrázku č.16 kde není známa příčina poklesu naměřené excentricity včetně okolo 30 týdnů měření. Kromě standardního parametru AE RMS je zde parametr Dristress®, který vykazuje vyšší citlivost na vznikající poškození včetně. Měření vibračního zrychlení prokázalo svoji vhodnost, jako nástroje pro identifikaci orientačního průběhu rozvoje kontaktního poškození.

RAHMAN, M.Z., OHBA, H., YAMAMOTO, T., YOSHIOKA, T.: A study on incipient damage monitoring in rolling contact fatigue process using acoustic emission. In: TRIBOLOGY TRANSACTIONS, Volume: 51, Issue: 5, Pages: 543 – 551, STLE, JAPAN, 2008, ISSN 1040-2004 print /1547-397X online.

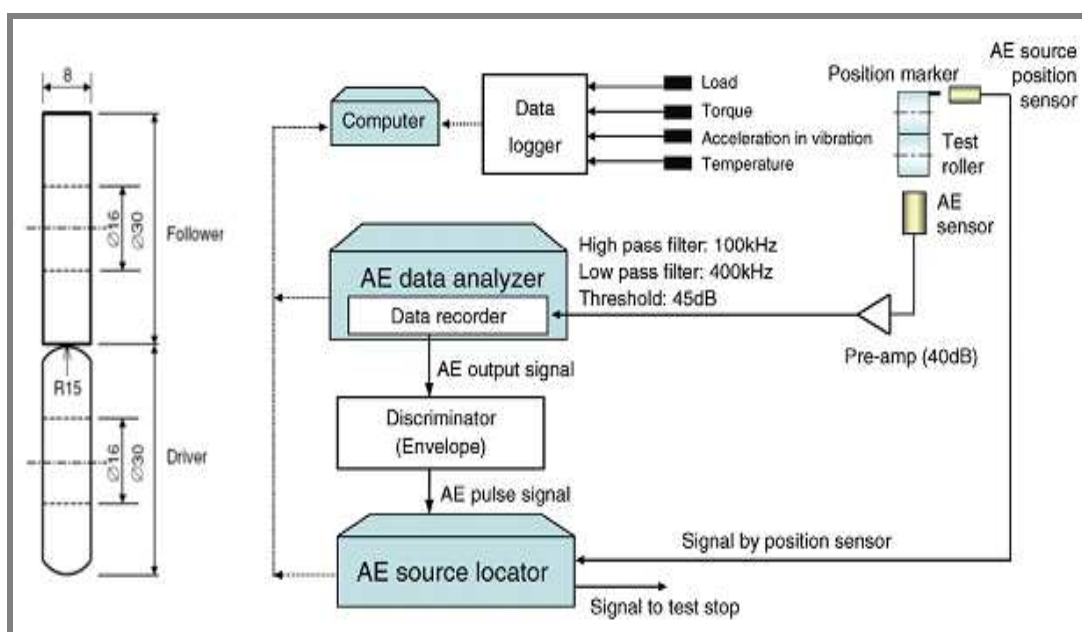
Tento vědecký článek je věnován získání poznatku počátku kontaktního poškození a jeho lokalizace na dvou radiálně zatížených kotoučích při stanovené rychlosti otáčení. Monitorování poškození bylo zaměřeno na opotřebení radiálních kol (zejména kol železničních vozů), byla využita metoda akustické emise (AE), která je velice citlivá a dokáže zachytit změny probíhající uvnitř materiálu s následným vznikem a šířením trhlin. Při monitorování experimentu byla použita dvojí aplikace AE, první aplikace je v monitorování AE překmitů přes nastavené energetické hladiny (Counts), druhá aplikace je pro identifikaci místa zdroje AE událostí během konstantních zatěžovacích podmínek.

Experiment

Během experimentu byly použity dva kotouče, jejichž geometrie je ukázána na obr. 20. Hnací kotouč se zakřiveným profilem byl vyroben z kalené nízkolegované oceli (SNCM420), pro hnaný válec s přímým profilem byla použita indukčně kalená ocel (S40C). Oba válce měly před spuštěním experimentu drsnost R_z 1.0 – 2.0 μm .

Měřicí vybavení

Obrázek 20 zobrazuje také schématický diagram celé testovací procedury. Sensor akustické emise byl umístěn na spodku olejové vany a výstupní signál byl zesílen o 40 dB. Druhý sensor AE je umístěn čelně ke značce polohy na válci, který je rozdělen na 100 úseků. Kompletní testovací soustavou použitou při experimentu je tedy snímač zatížení, momentový sensor, vibrační akcelerometr, sensor monitorující teplotu oleje, počítadlo otáček a již zmiňované dva snímače AE.



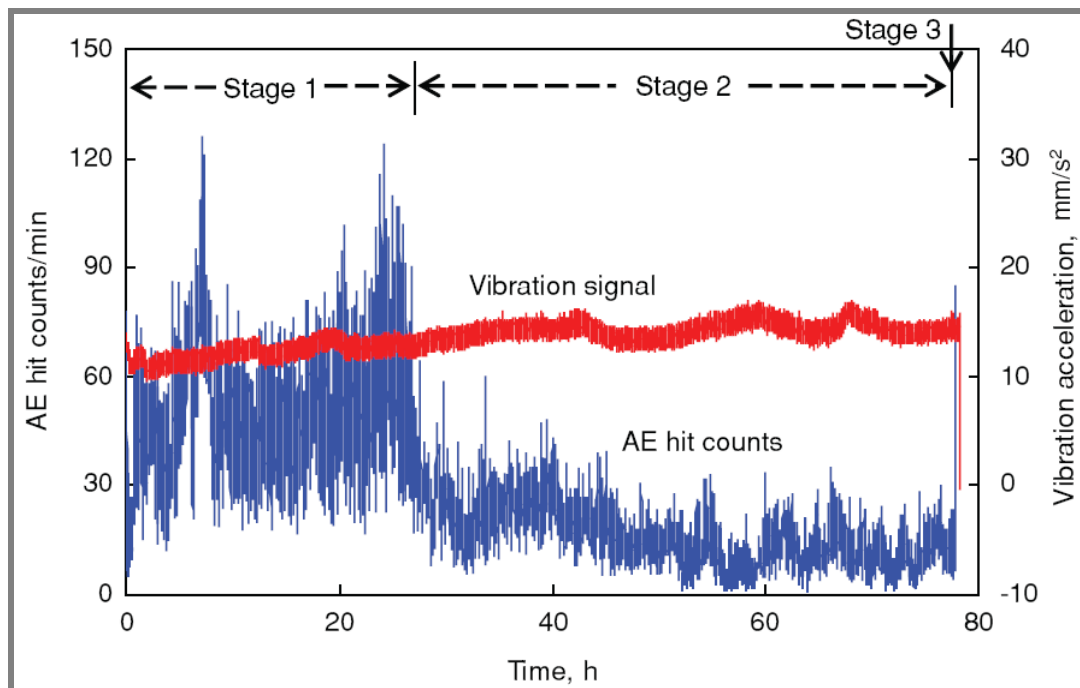
Obr. 20 Geometrie testovaných válců a schématický diagram sběru dat.

Podmínky měření

Zastavení testu bylo vztaženo na překročení počtu překmitů přes stanovenou prahovou hodnotu pro každý jednotlivý úsek kotouče. V tomto případě je vypnutý testu připisováno hodnotě 15 překmitů během 2 minut. Během testu byl použit maximální tlak 4.0 GPa za podmínky hrotového kontaktu s rychlostí otáčení hnaného válce 800 ot/min a poměrem prokluzu pevných kol kolem 9%. Mazání kontaktu probíhalo převodovým olejem API GL-5 (viskozita 178 mm²/s při 40 °C a 17 mm²/s při 100 °C, hustota 0.887 g/cm³).

Výsledky a diskuze

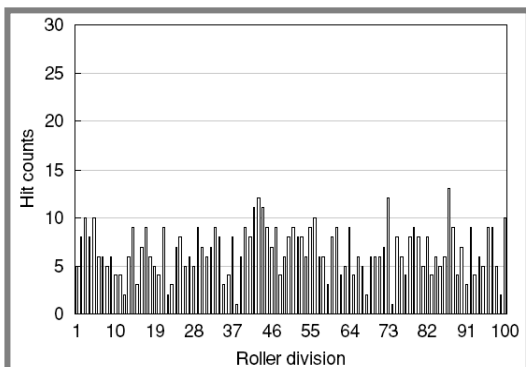
Průběh celého záznamu zkoušky je znázorněn na obrázku 21, kde je zobrazena závislost počtu překmitů AE za min. a vibrační zrychlení v závislosti na čase. Graf dále popisuje tři oblasti, číslem 1 je označen záběhový stav (running-in state), kde je nárůst AE vlivem počátečních nerovností povrchu a plastické deformace stykových ploch válců. Tomuto stavu odpovídá asi 1/3 z celkové doby zkoušky ($N=1.3 \times 10^6$ cyklů). Pokles signálu AE se označuje jako uzdravování (healing), následované oblastí 2 pojmenovanou jako ustálený stav (steady state). Ustálený stav trvá až do prvních známek poškození. V tomto případě bylo ukončení zkoušky nastaveno pro náhlé zvýšení překmitů AE (counts) v jednotlivých oblastech na válci (oblast 3). Monitorování vibračním akcelerometrem neukázalo zvýšené hodnoty v momentě ukončení zkoušky a jak je patrné z grafu, zrychlení mělo spíše stabilní růst během celého průběhu.



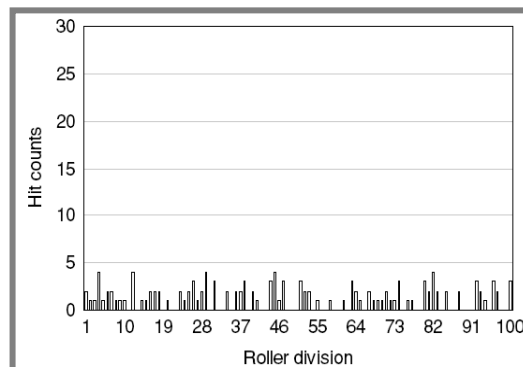
Obr. 21 Poměr počtu zásahů AE / min a zrychlení vibrací během testu.

V každém stádiu (záběhový stav, ustálený stav a první známky poškození) byly vyhodnocovány události AE ve frekvenční oblasti a zároveň v počtu překmitů AE counts na jednotlivých rozdělených úsecích válce. Obrázek 22a dokládá toto rozložení ve 24.hodině po spuštění zkoušky, tedy ke konci prvního stádia a obrázek

22b zobrazuje rozložení 10 minut po 60 hodině (stádium 2). Ani na jednom záznamu není překročena hodnota 15 Hit Counts, která charakterizuje moment ukončení zkoušky.

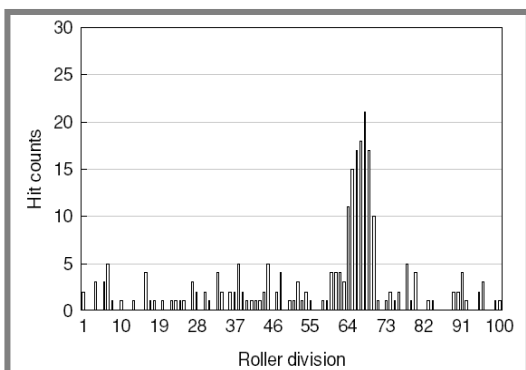


Obr. 22a Záběhový stav.

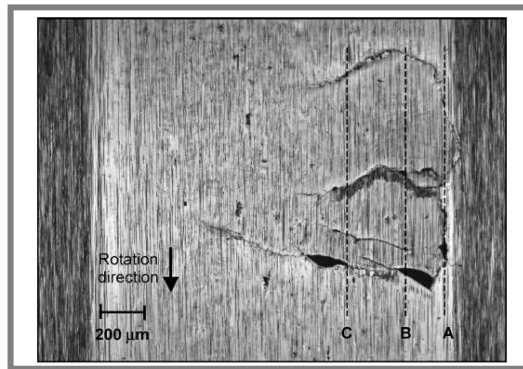


Obr. 22b Ustálený stav.

Autoři článku uvádějí typický popis amplitudy AE události v oblasti od 45 dB (0.017V) do 77 dB (0.7 V), proto také byla prahová hodnota nastavena na 45 dB. V oblasti ustáleného stavu nebyla prakticky tato prahová hodnota překročena. Třetí stádium je charakteristické zvýšeným signálem a značnou periodicitou praskavého signálu jako důsledek rozvinutého poškození v jednom místě hnaného kotouče. Obrázek 23 dokládá průběh rozložení AE překmitů na jednotlivých úsecích válce 10 minut před ukončením zkoušky, zde je vidět enormní aktivita na úseku označeném číslem 67.



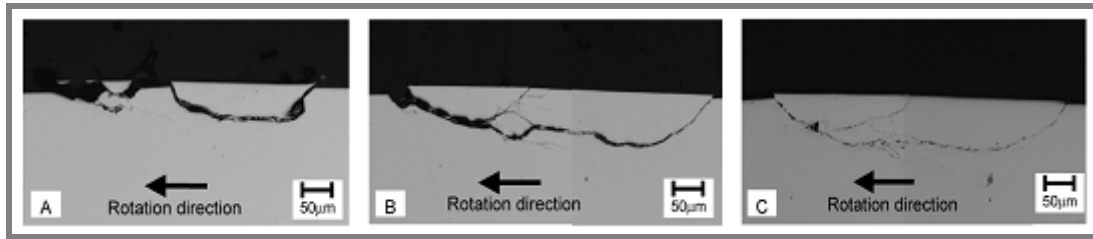
Obr. 23 10 minut před ukončením zkoušky.



Obr. 24 Morfologie poškození povrchu.

Chování poškození

První známky poškození byly objeveny vždy na hnaném kotouči z indukčně kalené oceli S40 s přímým profilem stykové plochy a toto poškození bylo rozlišitelné již pouhým okem (oblast na válci označena číslem 67). Úbytek hmotnosti hnaného kotouče byla 0.30 ± 0.05 mg, u hnacího jen o 0,5 mg méně. Průměrný moment byl 0,04 N-m a maximální teplota oleje 50 °C. Obrázek 24 ukazuje snímek povrchu kotouče, na kterém je počáteční poškození, jenž zapříčinilo zastavení testovací zkoušky ještě před dosažením odlupování povrchu. Na snímku jsou vyznačeny tři řezy A, B a C ve směru rovnoběžném s dráhou valení. Průřezový pohled řezu jsou znázorněny na obr. 25, kde je ukázáno šíření trhliny z místa vzniku pod povrchem kotouče, ale významné odlupování povrchu zatím ještě nenastalo.



Obr. 25 Pohled na průřez poškození hnaného válce.

Závěr

Experimentální zjišťování počátku vzniku a rozvoje poškození rotujících ocelových kotoučů prokázalo, že akustická emise je úspěšnou metodou jak identifikovat toto poškození. Senzor AE z olejové vany doplněný senzorem zaznamenávajícím polohu rotujícího disku společně umožnily identifikovat poměrně přesnou polohu rozvoje poškození na hnaném válci. Během experimentů bylo postupně použito celkem 10 kotoučů a vždy bylo identifikováno první poškození včetně určení místa výskytu. Proběhlému experimentu autoři přikládají i jistou unikátnost ve způsobu vzniku poškození. V podobných odborných člancích je většinou poškození vytvářeno umělou formou, zde byly testované kotouče v perfektním stavu a degradace povrchu se utvářela postupně, s myšlenkou reálného vzniku.

Poznátky pro Disertační práci

Nejblíže se experiment popisovaný v tomto článku přibližuje měření na experimentální zkušební stanici Rmat umístěné v laboratoři kontaktní únavy ÚK FSI. Obě stanice disponují podobnými otáčkami, ale liší se velikostí a umístěním testovaného vzorku. Na popisované stanici je vzorkem hnaný kotouč, který má dostatečně velký průměr pro umístění značky polohy, která byla v příspěvku využita pro identifikaci místa vzniku pittingu. V našem případě by vzhledem k velikosti válcového vzorku s malým průměrem okolo 10 mm bylo umístování značky polohy velice obtížné, ne však zřejmě nemožné. Experiment byl snímán jak metodou AE, tak i měřením vibračního zrychlení, přičemž obě metody lze v detekci poškození vzájemně porovnávat. V řešené disertační práci je také cílem získat porovnání AE a vibrační jak u testování ložisek, tak i ložiskových materiálů a v tomto případě může být článek použit pro podklady srovnání. Vytváření poškození je v tomto případě více přiblíženo reálnému procesu, samozřejmě s přispěním vyšších zatížení. Je tedy možné tento postup považovat za přirozenější, obsahující pravděpodobnější výsledky pro běžný provoz, než při umělém naočkování poškození, jak tomu bývá u většiny studií.

ROGERS, L. M.: Detection of incipient damage in large rolling element bearings. In: ADVANCED MATERIALS RESEARCH, Volume: 13-14, Pages: 37 – 44, TRANS TECH PUBLICATIONS, SWITZERLAND, 2006, online at <http://www.scientific.net>.

Článek se zabývá detekcí poškození, zapříčiněného únavou, třením, nebo třením při zastaveném (klidovém stavu) motoru. Předmětem zkoumání jsou nadměrně zatížené velké ložiskové elementy, které se využívají například při otáčení vysokých pracovních jeřábů nebo v pohonech lodních jednotek. Pro detekci poškození je zde využita akustická emise v kombinaci s hodnocením velikosti intenzity signálu a identifikace místa vzniku akusticko-emisních zdrojů.

Experiment

K experimentu byly použity jak radiální ložiska, tak i axiální ložiska s kuželíkovými valivými elementy vyobrazené na obr. 26, které jsou součástí pohonu námořních lodí. Už vzhledem k velikosti ložisek je správný předpoklad poměrně malých otáček. Vedle lokalizace místa vady (obr. 27) a celkové míry intenzity signálu se autoři zabývali i hledáním odezvy poškození ve frekvenční oblasti (obr. 28). Autoři článku představují tři typy měření, každé pro jiný stupeň poškození, tedy axiální ložisko s významným poškozením, axiální ložisko s menším poškozením a radiální ložisko bez poškození.



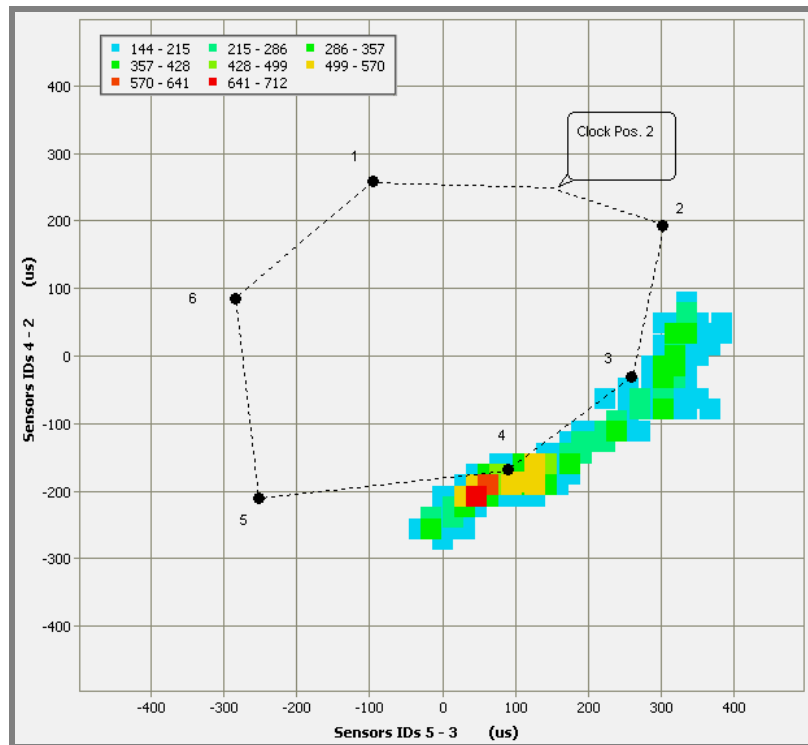
Obr. 26 Ukázka testovaného ložiska.

Měřicí vybavení

Šest snímačů AE bylo umístěno po obvodu ložiska tak blízko vnějšího kroužku, jak jen to bylo možné. Další dva snímače byly umístěny na protilehlé straně ložiska.

Podmínky měření

Při lokalizaci zdroje poruchy bylo využito lokalizačního grafu, kde jsou vyznačeny polohy snímačů AE v závislosti na velikosti časové odezvy. V případě prvního testovaného ložiska byly otáčky stanoveny na 28,5 ot/min, pro druhé testované axiální ložisko připadlo 45 ot/min a radiální ložisko bylo vystaveno 80 ot/min.

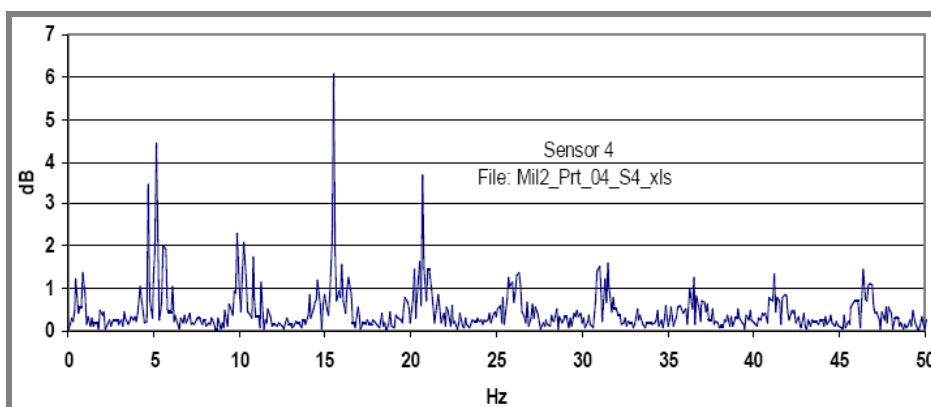


Obr. 27 Lokalizační diagram AE aktivity.

Výsledky a diskuze

Jak je patrné z obr. 27, pro lokalizaci poškození prvního testovaného axiálního ložiska je zvýšená emisní aktivita kolem snímačů 3 a 4. Z dvousekundového vzorku (asi dvě otáčky) je poskytnuto frekvenční spektrum (obr. 28). Ve spektru je patrné charakteristické poškození vnitřní dráhy ložiska (5,20 Hz) i se svými harmonickými složkami. Toto poškození odpovídá zhruba jedenáctinásobku otáčkové frekvence.

Testování druhého ložiska s menším poškozením mělo podobné výsledky jak předchozí ložisko. Také zde bylo poškození vnitřního kroužku a chybová frekvence (8,22 Hz) byla zjištěna jako jedenáctinásobek otáčkové frekvence. Lokalizace zdroje AE potvrdila poznatek již z prvního měření a to, že se největší intenzita signálu AE objevuje v místě kolem nejvyššího zatížení ložiska.



Obr. 28 Frekvenční spektrum záznamu poškozeného ložiska pro 2 s vzorek (2 otáčky).

Závěr

Článek udává výpočet několika parametrů (přírůstek plastické deformace, rychlost při náhlém šíření trhliny, charakteristickou frekvenci přírůstku trhliny, rozložení špičkové amplitudy podélné vlny a plochu přírůstkového lomu trhliny). Na ložisku se může vyskytovat celá řada potenciálních zdrojů AE aktivity, jedněmi z nich mohou být poškození kroužku v místě uložení nebo kolmé rýhy na dráze ve směru valení. Poškození v místě uložení může vzniknout v důsledku uložení s vůlí, kde kroužek, který má být pevně spojen s hřídelí nebo ložiskovým domkem, jakkoli pohybuje. Dalším zmiňovaným poškozením s ohledem na životnost ložiska podstatně vážnějším je poškození dráhy příčnými vrypy (obr. 29). Tento druh poškození vzniká při klidovém stavu stroje, kdy je vlivem nepříznivých radiálních, či axiálních sil (záleží na typu ložiska) vydržena kolmá stopa poškození na směr valení. Článek také poukázal na vhodnost kombinace lokalizace zdroje AE s analýzou obálky spektra signálu.



Obr. 29 Ukázka poškození kroužku ložiska (FALSE BRINELLING).

Poznatky pro disertační práci

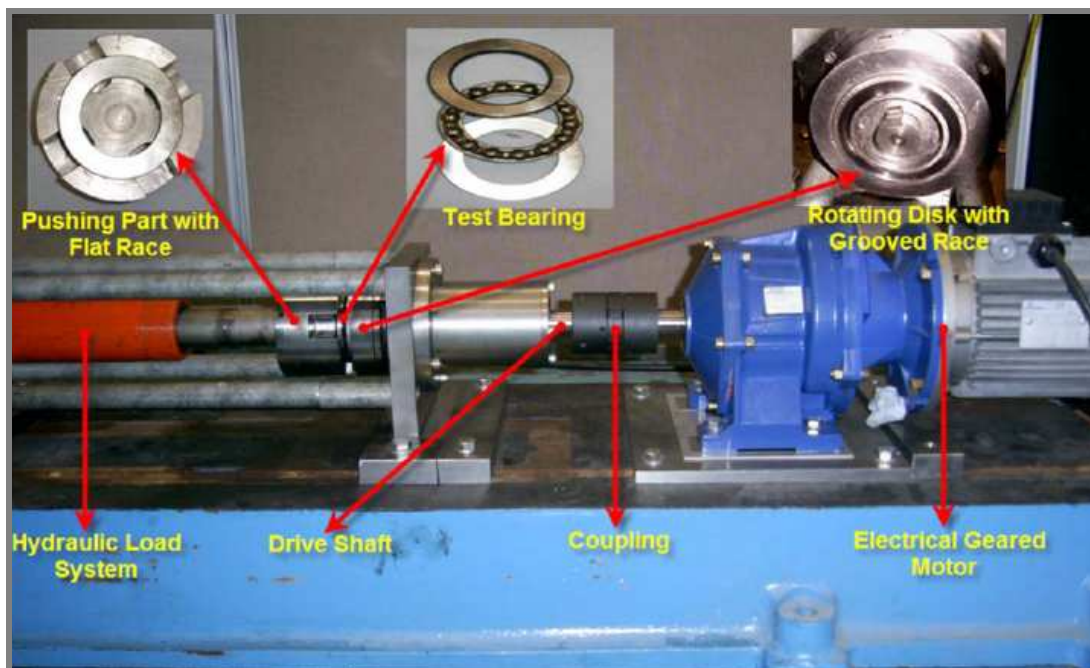
V článku byla prokázána vhodnost využití monitorování akustickou emisí i na tak objemných ložiscích, jako jsou používány u lodních jednotek pohonu nebo otočných podstav stavebních jeřábů. Článek je zajímavý i výpočtem parametrů spojených s rychlostí a velikostí šíření trhliny, pro které je však nutné znát například interatomickou vzdálenost ve směru smyku, hustotu materiálu a pod. Poškození, která se objevují jako špičky ve frekvenčním spektru, jsou poměrně přesně identifikovatelná v závislosti na otáčkové frekvenci i s jejími harmonickými složkami.

ELFORJANI, M., MBA D.: Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in slow speed rolling element bearing with acoustic emission. In: JOURNAL OF VIBRATION AND ACOUSTICS-TRANSACTIONS OF THE ASME, Volume: 130, Issue: 4, Pages: 14, ASME, USA, 2008, ISSN 1048-9002.

Článek je věnován aplikaci akustické emise jako nástroje pro detekci vzniku a rozvoje kontaktního poškození na vzorcích ložiskových materiálů a jako doplňkové a porovnávací měření je použito vibračních akcelerometrů. Součástí testovací výbavy je axiální kuličkové ložisko (klec s kuličkami), jehož jeden kroužek je nahrazen plochým kroužkem válečkového axiálního ložiska stejných rozměrů. Touto náhradou vzniká na styku kuličky s plochým kroužkem bodový kontakt a dochází tedy k enormnímu nárůstu stykové síly s rychlejší degradací povrchu (kratší doba zkoušky).

Experiment

Experiment je zaměřen na identifikaci vzniku a rozvoje mikrotrhlin v materiálu ložisek, zvláště pak v monitorování šíření podpovrchových trhlin, až do vzniku viditelných poškození na povrchu stykových ploch. Práce obsahuje dvě vypočtené a experimentálně aplikované případové studie, lišící se různým stupněm axiálního zatížení ložiska. Jedním z cílů měření bylo identifikovat poškození u pomaloběžných strojů, proto byla zvolena frekvence otáčení 72 ot/min. Testované ložisko s celou testovací stanicí jsou zobrazeny na obr. 30.



Obr. 30 Testovací stanice s detaily jednotlivých částí.

Měřicí vybavení

Klíčovým prvkem je jednořadé axiální kuličkové ložisko s označením SKF 51210, jehož jeden vnější kroužek byl nahrazen plochým kroužkem axiálního válečkového ložiska SKF 81210 stejných rozměrů. Pohon je zajištěn zpřevodovaným motorem (Motovario-Type HA52) přes spojku, podporu, v níž je umístěno axiální válečkové

ložisko SKF 81214 TN zamezující působení síly na spojku, až k pouzdru pro upnutí tvarového kroužku kuličkového ložiska viz. obr. 30. Plochý (nahrazený) kroužek přitlačovaný na klec s kuličkami je uchycen ve speciálním pouzdru, na které lze působit stanovenou silou pomocí hydraulického válce.

Pro snímání byly použity čtyři snímače akustické emise (PICO) s operačním rozsahem 200-750 kHz a dva termočlánky (RoHS typ: Jx1 M 455-4371) přilepené na zadní straně plochého kroužku. Použití předzesilovačů zajistilo zesílení signálu o 40 dB. Analyzátor AE zaznamenával události vzorkovacích frekvencí 2 MHz a ostatní parametry (counts, rms, průměrná hladina signálu, maximální amplituda a absolutní energie) s konstantní periodou 10 ms a vzorkovací rychlostí 100 Hz. Měření doplňoval jeden akcelerometr umístěný na speciálním pouzdru pro měření vibračního zrychlení v axiálním směru.

Podmínky měření

Jak již bylo v úvodu zmíněno, měření obsahuje dvě případové studie s různým stupněm zatížení ložiska. Jako příklad je uvedena část vstupních dat a předpokládaná životnost uzavírající výpočet studie viz obr. 31. Vypočtená případová studie obsahuje: vstupní data, dále jsou v ní obsažena doplňková data, vypočtené napětí a deformace povrchu a tři různé teorie výpočtu podpovrchového napětí (Thomas and Hoersch theory, Lundberg and Palmgren theory, von Mises distortion energy theory). Studii uzavírá předpokládaná životnost dráhy jak hladkého, tak tvarového kroužku. Druhá případová studie obsahovala změnu pouze ve velikosti zatížení, zatímco v první bylo celkové zatížení 50000 N, ve druhé pouze 35000 N.

Input data		
Load applied (N)	50000	
Number of balls	14	
Ball radius (mm)	5.75	
Race groove radius (mm)	5.8	
Mean bearing diameter (mm)	64	
Rotational speed (rpm)	72	
Thomas and Hoersch theory		
	Flat race	Groove race
Maximum shear stress (N/mm ²)	2215	628
Shear-pressure stress ratio (%)	34.16	30.76
Depth below the surface (mm)	0.241	0.158
Depth/semiminor axis of ellipse contact (%)	47.00	77.00
Race life prediction		
	Flat race	Groove race
Basic dynamic load rating (N)	23,556	61,874
L10 (day)	1	18

Obr. 31 Část tabulky obsahující data pro případovou studii I.

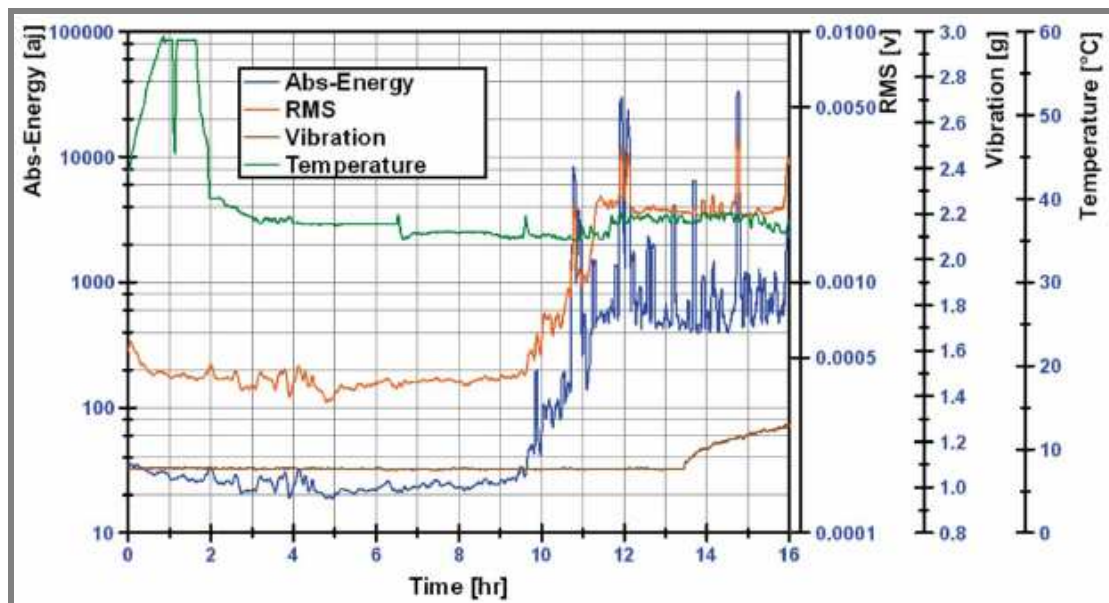
Výsledky a diskuze

Jedním z výstupů v tomto článku byla snaha o lokalizaci počátku poškození dráhy plochého kroužku. Proto se na zadní stranu testovaného kroužku symetricky nalepily čtyři snímače AE a pomocí Hsu-Nielsenova zdroje se testovalo relativní zeslabení signálu [dB] v závislosti na vzdálenosti zdroje AE od jednotlivých snímačů. Z výsledků dosažených tímto testováním byla stanovena prahová hodnota na 52 dB pro vyloučení šumu okolí a vypočtena rychlost vlny AE (4000 m/s).

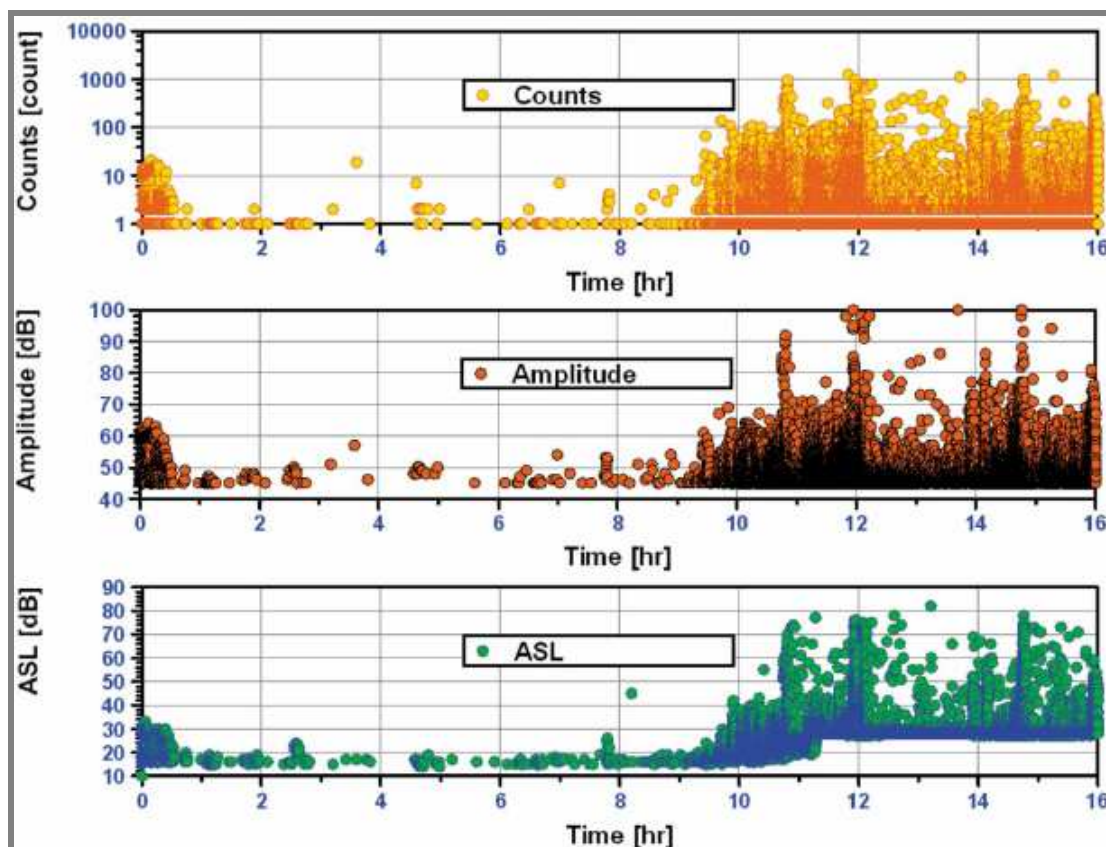
Kromě tradičních parametrů AE byla zaznamenávána i hodnota míry kontinuálního kolísání a průměrná hodnota amplitudy AE označena jako ASL [dB] vypočtená z RMS [mV/100] dle rovnice (6). Průběh celé zkoušky případové studie 1 je zobrazen v grafu na obr. 32. Zkouška probíhala 16 hodin, při kterých už bylo viditelné poškození dráhy. Z průběhu grafu je patrný pozvolný nárůst RMS a Abs energie asi od deváté hodiny zkoušky, zatímco vibrace poukázaly na zhoršení povrchu až ve 13,5.h. Zajímavý průběh ukázalo měření teploty, jejíž hodnoty byly enormně vysoké v záběhovém stavu první dvě hodiny zkoušky. Vysoké špičky AE aktivity od 10.h do 16.h jsou přisuzovány procesu vzniku a šíření nových výrazných poškození na povrchu testovaného kroužku.

Další zajímavostí v průběhu zkoušky byla oblast kolem 4.h záznamu, kde došlo k malému zvýšení emisní aktivity. Průběh parametrů Counts, Amplitudy a ASL, kde amplituda i counts potvrdily také zvýšení v oblasti 4.h, jsou znázorněny na obr.33.

Rovnice (6): $ASL = 20 \log_{10}(1,4 * RMS)$



Obr. 32 Graf průběhu studie I se všemi sledovanými parametry v závislosti na čase.



Obr. 33 Standardní sledované AE parametry v závislosti na čase v průběhu zkoušky.

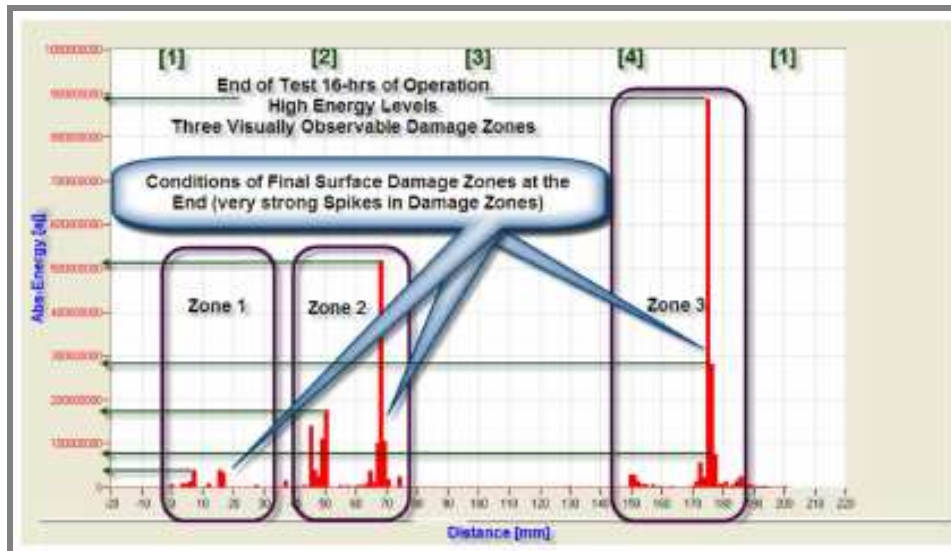
Při frekvenční analýze byly významné složky v 10 h měření na frekvenci 18 Hz, ke konci měření tj. 16.h se nejvýrazněji objevovala frekvence 9 Hz. Tento posun je přisuzován uhlazování již vytvořených trhlin a tedy uklidnění četnosti rázů při průchodu kuličky po poškozeném povrchu.

Obrázek 34 zobrazuje vzniklé poškození po 16 hodinách měření, ve vyjeté dráze plochého kroužku jsou názorně vidět tři oblasti pittingu (rozměry dráhy kroužku jsou odvozeny od rozměrů kuličkového ložiska viz obr. 2).



Obr. 34 Výsledné poškození testovaného kroužku.

Vedle identifikace (časového) momentu vzniku kontaktního poškození zde byl i zájem určit místo vzniku poškození. Jak již bylo zmíněno na začátku článku, na testovaném kroužku byly symetricky umístěny čtyři snímače a pomocí Hsu-Nielsenova zdroje zde byla testována schopnost detekce místa zdroje AE aktivity. Obrázek 35 zobrazuje detekovanou polohu poškození po 16 hodinách, tedy v momentě těsně před ukončením měření. Zóny 1, 2 a 3 jsou oblasti odpovídající fyzickému umístění výsledných poškození kroužku, energetické špičky jsou záznamy projevu poškození a tedy plně odpovídají oblastem, v nichž se výsledné poškození objevilo.



Obr. 35 Lokalizace poškození testovaného kroužku případové studie I.

Závěr

Druhá případová studie ukázala podobné chování AE aktivity i za nižšího zatížení. Opětovné výkyvy AE okolo 4.h zkoušky jsou připisovány vzniku prvním podpovrchovým, nebo povrchovým trhlinám, které se ale postupně rozválcují a tak dojde k poklesu AE. V obou proběhlých měřeních je tento moment prvním výskytem poškození. Periodicita zvýšené aktivity ve frekvenční oblasti těsně před ukončením zkoušky (18 h) byla opět blízká hodnotě 9 Hz, stejně jako u prvního případu. Provedená měření dokázala spolehlivě prokázat závislost zvýšení AE aktivity na rozvíjejícím se (přírodním) poškození. Metoda AE se dále ukázala u pomaloběžných strojů více citlivá než metoda vibračního měření.

Poznatky pro disertační práci

Případové studie provedené v tomto článku se v souvislosti s řešenou disertační prací nejvíce blíží experimentálnímu měření na stanici Axmat v laboratoři kontaktní únavy ÚK. Na stanici Axmat je možno testovat jak axiální ložiska, tak i ložiskové materiály v podobě rotačních disků. Vlivem záměny testovaného kroužku a tím i změně působících tlaků na ložisko došlo vlastně k urychlení zkoušky, která by jinak trvala několikanásobně déle (ve studii je možné vidět vypočtenou životnost ložiska jak pro plochý kroužek, tak pro tvarový kroužek). Při provádění experimentálních zkoušek v rámci disertační práce je také velká část testů zkracována změnou zatížení, či dokonce změnou mazání. Dalším sledovaným parametrem, s nímž je v disertační

práci počítáno, je monitorování vibrační rychlosti a vibračního zrychlení. Tento článek, také jako mnohé další, poukazuje na menší citlivost vibrační metody, avšak je to jeden z nejspolehlivějších nástrojů pro ověření probíhajících změn na povrchu součásti, jako je šíření trhlin a odlupování vrchních vrstev materiálu.

Autoři článku dokázali velice přesně identifikovat polohu zdroje AE na testovaném kroužku, jak dokládá porovnání získaného grafu lokalizace s reálným poškozením na testovaném kroužku. Lokalizace zdroje je možná pouze v případě dostatečně velkého zkušebního tělesa (pro vhodné umístění snímačů AE přímo na kroužek, nebo do jeho těsné blízkosti), v našich podmínkách by tento postup nebyl zcela jednoduchý. Sledování teploty je taktéž nedílnou součástí moderního monitorování, avšak v první prezentované případové studii byla během dvou hodin teplota extrémně vysoká a po 2 hodinách chodu klesla. Tento průběh absolutně nesouhlasí s průběhem teploty pro druhou případovou studii, kde byl průběh poměrně pozvolný a během jedné hodiny se ustálil na provozní teplotu.

Huang, Q., Li, L., Rao, H., Jin, F., Tang, Y.: The AE law of sliding bearings in rotating machinery and its application in fault diagnosis. In: CHALLENGES OF POWER ENGINEERING AND ENVIRONMENT 2007, Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Volume: 1, Pages: 5414-5446, Springer Berlin Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-76694-0 (Online).

Experiment

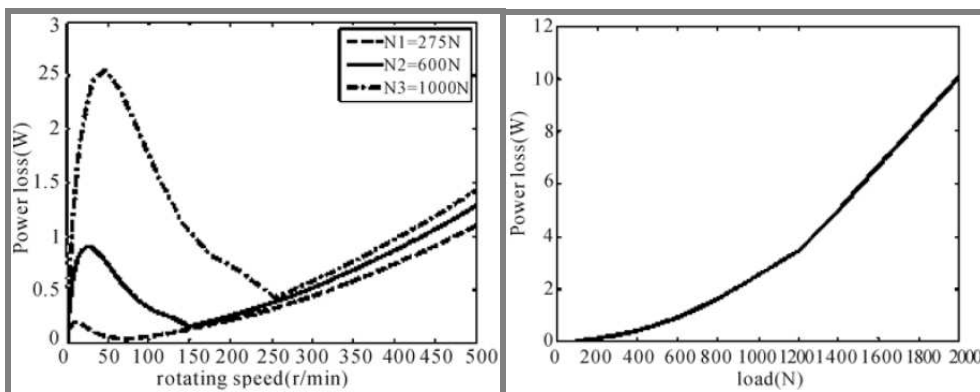
Pro identifikaci poškození strojních součástí existuje celá řada metod, mezi které patří například vibrační diagnostika, nebo spektrometrická analýza oleje (SOA). Použití většiny těchto metod však nezaručuje zachycení vzniku počátečního poškození a ve většině případů je zjistitelné až při jeho větším rozvoji. Článek obsahuje úvod do mechanismů AE kluzných ložisek, používaných u rotačních strojů a poukazuje na faktory ovlivňující intenzitu AE signálu. Hlavním výstupem je srovnání AE a vibrační metody v monitorování kluzného ložiska při různých (nestandardních) stavech, které mohou v provozu nastat.

Podmínky měření

Parametry ovlivňující kontaktní podmínky: Radiální zatížení $F = 275$ N, součinitel drsnosti $\sigma = 3,2 \times 10^{-6}$ m, ložisková vůle $C = 8 \times 10^{-5}$ m, šířka ložiskového kroužku $L = 35$ mm, poloměr hřídele $R=35$ mm a dynamická viskozita za normální teploty $\mu = 0,0195 \times 10^{-3}$ Pa.s. Pro testovací zkoušky byl použit generátor o výkonu 300 MW.

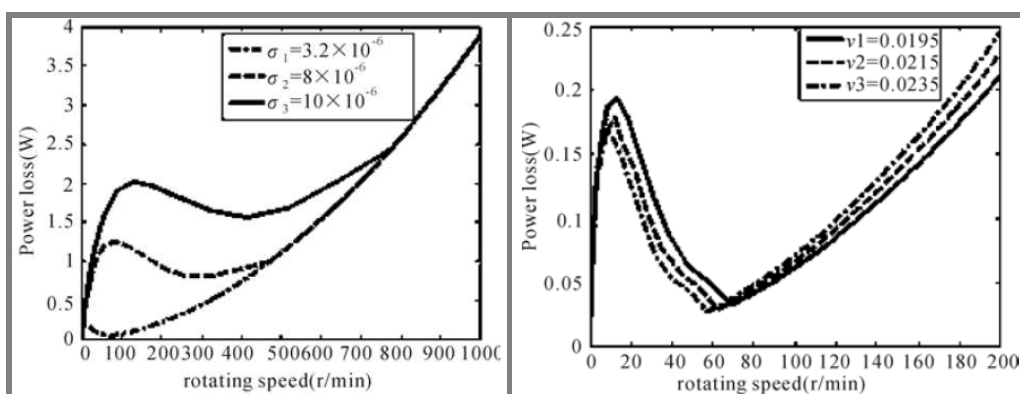
Výsledky a diskuze

S proměnným zatížením kontaktu se mění i excentricita uložení hřídele v ložisku a tím i velikost tření v místě kontaktu, tření pak generuje aktivitu AE. Obr 36a zobrazuje závislost průběhu ztrát výkonu na rychlosti otáčení hřídele pro tři rozdílná zatížení. Jak je z grafu patrné, v oblasti nízkých otáček (50 ot/min) je energetická (výkonová) ztráta velice významná, pak následuje pokles a se zvyšujícími se otáčkami má přibližně parabolický průběh. Obr. 36b zobrazuje průběh ztrát výkonu na velikosti zatížení kontaktu při konstantních otáčkách, zatímco průběh otáček v závislosti na změně zatížení je téměř lineární. Podobné chování průběhu výkonových ztrát v závislosti na rychlosti otáčení hřídele vykazují povrchy s vyšší drsností, jak dokládá obr. 37a. Další zvyšování otáček (oblast hydrodynamického mazání) vede opět k nárůstu ztrát, avšak na rozdíl od rozšiřujícího se průběhu pro jednotlivá zatížení ve vyšších otáčkách (1000 – 3000 ot/min) je průběh pro různé drsnosti povrchu prakticky identický. Podobné průběhy, jako je znázorněn na obr 36b, jsou u závislosti energetických ztrát na velikosti drsnosti povrchu a rovněž rychlosti otáčení (osa y) na velikosti drsnosti povrchu (osa x).



Obr. 36a Závislost energetických ztrát na počtu otáček pro různě stanovená zatížení.

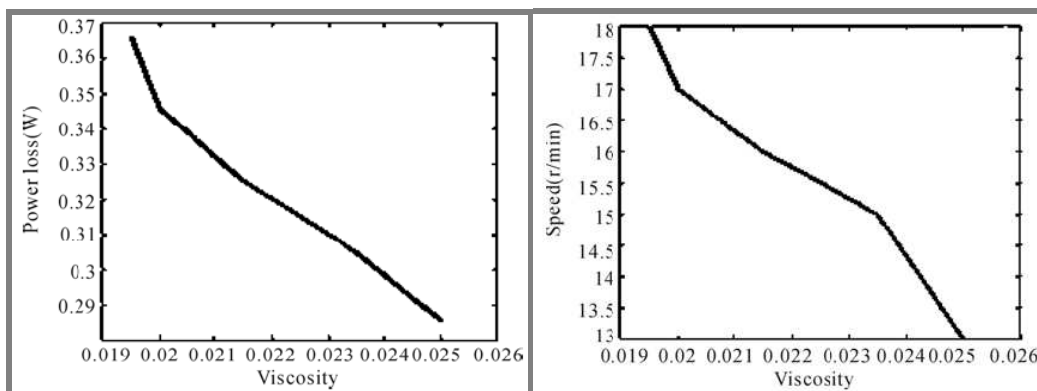
Obr. 36b Průběh energetických ztrát na změnu zatížení při konstantních otáčkách.



Obr. 37a Průběh energetických ztrát na počtu otáček pro různé drsnosti povrchu.

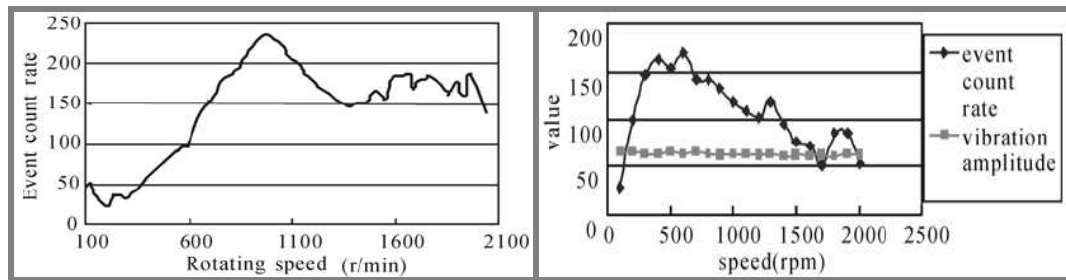
Obr. 37b Průběh energetických ztrát na počtu otáček pro různě viskózní maziva.

V provozu se mění teploty mazacích olejů a tím i viskozita použitého maziva. Obr. 37b zobrazuje průběh výkonových ztrát na otáčkách hřídele pro rozdílnou viskozitu maziva v podobném znění, jako při různém zatížení a drsnosti povrchu. Z grafu je zřejmé, že v oblastech velmi nízkých otáček (20 ot/min) má větší ztráty mazivo s nižší viskozitou, ale pro vyšší a vysoké otáčky (3000 ot/min) se projevuje vyšší účinnost u méně viskózního maziva. Průběhy závislosti ztrát výkonu a rychlosti otáčení na velikosti viskozity mají klesající charakter (obr.38a resp. obr.38b).



Obr. 38a Závislost energetických ztrát na velikosti viskozity maziva.

Obr. 38b Závislost rychlosti otáčení hřídele na velikosti viskozity maziva.



Obr. 39a Průběh počtu událostí AE v závislosti na rychlosti otáčení hřídele.

Obr. 39b Porovnání průběhu záznamu AE (counts) s vibracemi v závislosti na otáčkách hřídele.

Obrázek 39a zobrazuje průběh četnosti výskytu nových událostí AE v závislosti na zvyšující se rychlosti otáčení. Srovnání metody AE a vibračního měření je ukázáno na obr. 39b, kde je jasně zřetelná několikanásobně vyšší citlivost AE oproti zaznamenané vibrační amplitudě.

Závěr

Z provedených měření je patrné, jak výrazný vliv mají změny podmínek (zatížení, drsnosti povrchu, viskozity) na velikost energetických ztrát způsobených třením v místě styku povrchu kluzného ložiska s uložením rotačního hřídele. Záznamy z měření dále ukázaly i průběhy energetických ztrát pro různé velikosti faktorů (zatížení, drsnost povrchu, viskozita) ovlivňujících provozní podmínky v širokém spektru velikosti otáček (0 – 3000 ot/min).

Zvýšené projevy energetických ztrát jsou čitelné i v monitorování ložiska AE. Při analýze signálu z vibračního měření lze vyčíst přibližný trend stavu ložiska, ale záznam AE svojí citlivostí vibrační měření značně převyšuje a dokáže tak odhalit vznikající poškození již mnohem dříve.

Poznatky pro Disertační práci

Článek dokládá vhodnost využití monitorování AE i na kluzná ložiska, kde se ověřila schopnost detekce změn v signálu AE i při různých podmínkách (změny viskozity maziva, zatížení, drsnosti povrchu) testovacího provozu. Autoři článku použili stejně, jako mnozí jiní autoři, srovnání záznamu AE a vibračního měření jak pro ověření správné detekce poškození, tak pro srovnání rychlejšího nalezení vzniku poškození. V článku nejsou obsaženy některé parametry, například hustota použitého maziva, nebo informace o snímačích a měřicí aparatuře.

BARAN, I., NOWAK M., DARSKI, W.: Application of acoustic emission in monitoring of failure in slide bearings. In: JOURNAL OF ACOUSTIC EMISSION, Volume: 25, Pages: 341-347, ACOUSTIC EMISSION GROUP, Encino CA, USA, 2007, ISSN 0730-0050.

Článek popisuje testování kluzných ložisek, které jsou součástí uložení pohybových ústrojí u lodních vznětových motorů. Prvotním záměrem je ověřit použitelnost metody AE na tento typ ložisek k zachycení prvních stádií poškození, dále pak detekce změn AE při měnících se provozních podmínkách. Mezi testované proměnné faktory patří: změna otáček motoru, změna velikosti působícího zatížení na ložisko a vliv nedostatku maziva. Autoři článku se zatím pokoušeli pouze o určení použitelnosti metody, proto zde jsou obsaženy pouze první experimentální výsledky.

Experiment

Testovací zkoušky probíhaly v laboratorních podmínkách na stanici PG-2 1L předem k tomuto výzkumu sestavené. Stanice dokáže simulovat výkonové podmínky ložiska a současně zaznamenávat základní parametry: třecího momentu, rychlosti otáčení, teploty ložiska a mazacího oleje. Technické parametry stanice jsou: výkon 11 kW, otáčky 1 – 4000 ot/min, maximální přenesené zatížení 150 kN, průměr hřídele 76,18 nebo 80,25 mm, šířka kroužku 36,75 nebo 40,00 mm. Testované ložisko má označení MB10 a je užíváno v dieselovém motoru C-330. Ložiska byla testována ve třech zatěžovacích podmínkách, první varianta: konstantní otáčky 1700 ot/min a konstantní přenesené zatížení 1 nebo 2 kN, druhá: proměnné otáčky 1–17000 ot/min a konstantní zatížení 1 nebo 2 kN, a třetí: proměnné otáčky 1–17000 ot/min a skokově měněné zatížení 1, 2, 4 a 8 kN.

Měřicí vybavení

Pro měření AE byl použit přístroj Vallen AMSY5 se snímači VS150RIC-Vallen a WD-PAC.

Podmínky měření

První série testů měla za úkol naměřit AE aktivitu generovanou strojním ústrojím s nepoškozeným ložiskem v různých zatěžovacích podmínkách a při různé rychlosti otáčení. Dále bylo třeba zaznamenat co možná nejširší frekvenční rozsah, ze kterého se pomocí vysoko-pásmových a nízko-pásmových filtrů vybrala vyšetřovaná oblast vlivu ložiska a eliminovala se AE z rušivého okolí.

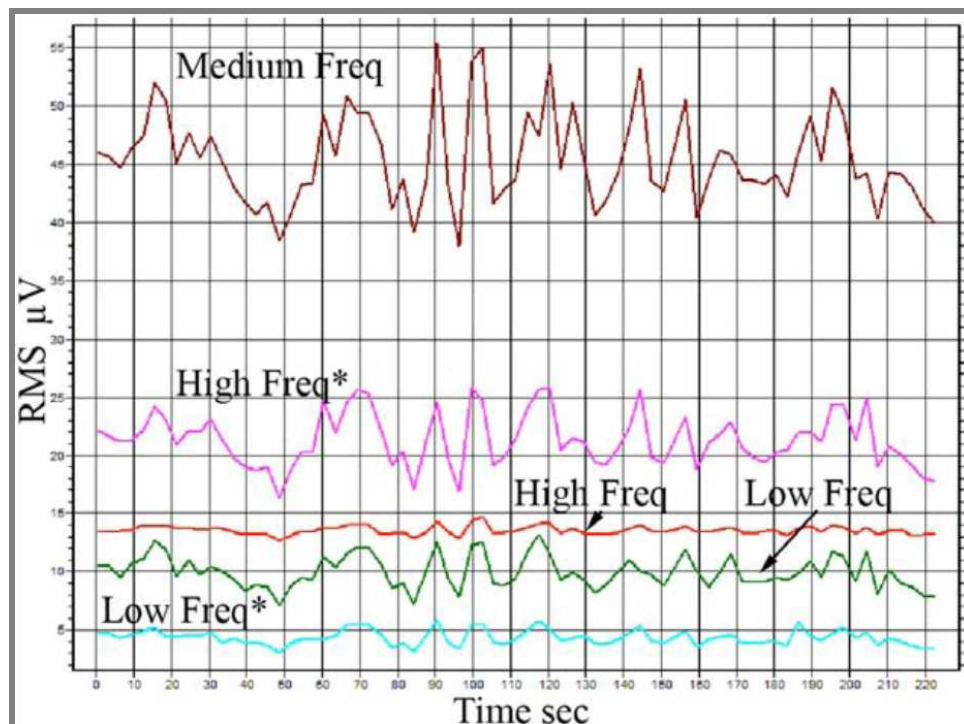
Podmínky následujícího měření s použitými frekvenčními filtry byly dány otáčkami hřídele 1700 ot/min a zatížením ložiska 1 kN a 2 kN. Třemi úvodními zkouškami byly stanoveny základní parametry AE pro porovnání dalších měření s definovaným defektem na dráze ložiska.

Celkem byly měřeny tři rozdílné stavy ložiska:

1. Nové ložisko bez defektu.
2. Ložisko s drobným defektem v materiálu kroužku.
- 3- Ložisko s významnými podélnými rýhami jako simulace výrazného poškození.

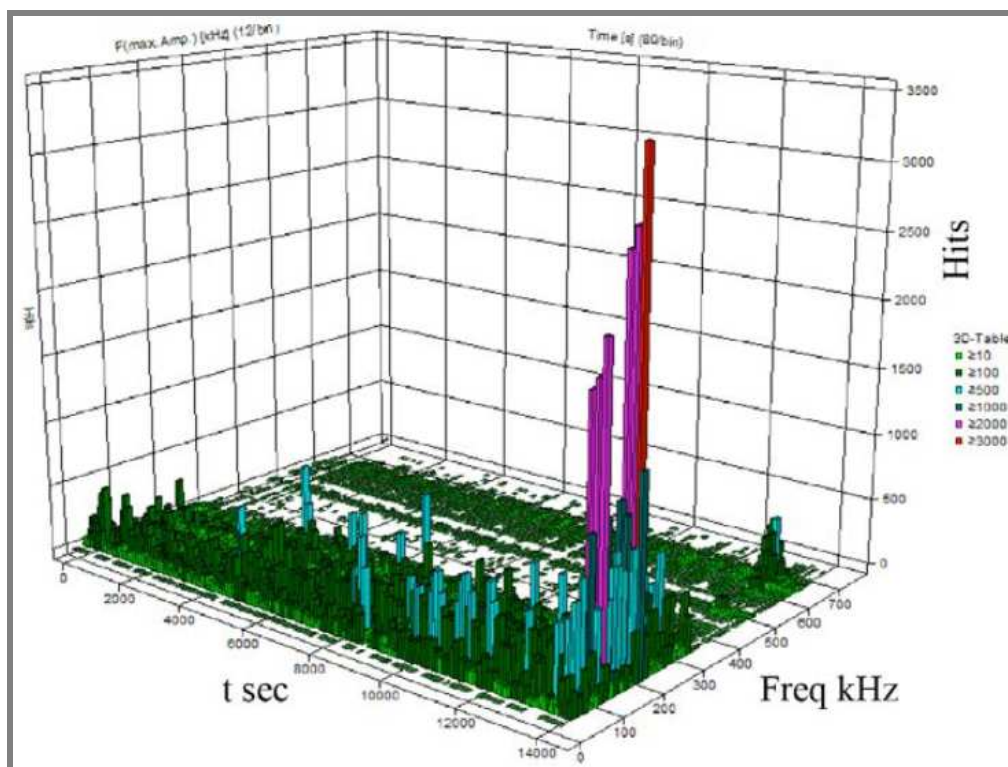
Výsledky a diskuze

Aktivita AE testovaných ložisek byla sledována parametry Hits, Counts, Duration, Energy a RMS. Porovnání výsledků jednotlivých vzorků bylo vzhledem k různým prahovým hodnotám značně obtížné. Jako nejvhodnější parametr pro porovnání výsledků se jevil průběh RMS filtrovaný pro různé frekvenční rozložení, jak dokládá obrázek 40, kde jsou vyznačeny průběhy vysokých a nízkých frekvencí a průběh střední frekvence. Celkem byly vytvořeny tři grafy pro každý jednotlivý stav ložiska. Porovnáním průběhů stejně filtrovaných signálů (High Freq* - Low Freq*) pro zdravé ložisko a poškozené ložisko podélnými rýhami byl zjištěn významný rozdíl RMS, kdy se posunula střední frekvence zdravého ložiska z průměrných 14 μV až na 48 μV .



Obr. 40 RMS pro rozdílné rozsahy frekvenčních filtrů – ložisko bez defektu.

Během testování bylo nové ložisko podrobeno proměnlivým podmínkám jak ve vztahu k použitým otáčkám, tak i vzhledem ke skokovým změnám zatížení. Tyto změny v testovacích podmínkách vedly k urychlení opotřebení a zkrácení životnosti ložiska. Obrázek 41 zobrazuje graf sumačního rozdělení AE zásahů ve snímaném frekvenčním rozsahu, kde na ose x je čas [s] na ose y frekvence [kHz] a na ose z počet překmitů přes nastavené prahové úrovně (Hits). V grafu je výrazné zvýšení AE aktivity kolem časové oblasti 12000 s, které indikuje opotřebení povrchových vrstev ložiska. Toto poškození detekované AE není patrné v parametrech třecího momentu, ani teploty kterou zaznamenává testovací stanice PG-2 1L.



Obr. 41 Sumačního rozdělení AE zásahů ve snímaném frekvenčním rozsahu.

Závěr

Použití frekvenčních filtrů umožňuje redukovat AE aktivitu okolního šumu a zaměřit se tak výhradně na sledovaný strojní uzel. Prozatím byly tyto zkoušky provedeny pouze na testovací stanici a v budoucnu se plánuje použití na reálných motorech. Grafy ze získaných měření dokazují možnost použitelnosti aplikace AE při určování stavu testovaného ložiskového materiálu.

Poznatky pro Disertační práci

Článek dokládá použitelnost AE i v oblasti kluzných ložisek, kde alespoň jedna kontaktní plocha je vyrobena z poměrně měkkých materiálů (bronzy, slitiny AL). Velice zajímavé jsou trojrozměrné grafy (čas, frekvence, zásahy), které poskytují jakýsi ucelený pohled na průběh zkoušky. Sledování parametru RMS pro jednotlivé stavy (zdravé ložisko, mírně poškozené a s defektem) ložiska je bezpochyby užitečné, avšak v článku není zmíněno, jaké hodnoty byly považovány za vysoké a nízké frekvence.

THEOBALD, P., ZEQRIRI, B., AVISON, J.: Couplants and their influence on AE sensor sensitivity. In: JOURNAL OF ACOUSTIC EMISSION, Volume: 26, Pages: 91-97, ACOUSTIC EMISSION GROUP, Encino CA, USA, 2008, ISSN 0730-0050.

Experiment

Článek se zabývá vlastnostmi vazebného prostředí na přenos ultrasonické energie z povrchu sledovaného vzorku do snímače akustické emise (AE). Přítomnost vazebného prostředí má velký význam na kvalitu i kvantitu přeneseného vlnění. Vzduch přítomný mezi kontaktními plochami má až o pět řádů nižší odpor prostředí, ve kterém se akustické vlnění pohybuje, oproti přímému styku povrchů. Kvalitní vazebné prostředí má až o 4 řády vyšší hodnoty, než má vzduch. Experiment popisuje charakteristiky několika vyšetřovaných vazebních prostředí na kvalitu podélného a příčného vlnění, dále zohledňuje efekt výběru vazebného prostředí na určení citlivosti senzorů během kalibrace.

Vazebné požadavky

Při výběru vhodného vazebného prostředí je nutné zohlednit hned několik základních faktorů, mezi které patří: teplotní stabilita v závislosti na délce měření, možnost výměny senzorů, tvar povrchu, zdroje vibrací, které mohou senzor posunout, teplota stykového povrchu a další. Obecně je akustický výkon určen: akustickou impedancí (odporem prostředí), akustickou absorpcí a velikostí vazebné vrstvy. Navíc jsou ještě kladeny požadavky na dobrou schopnost vytěsňování vzduchových bublin z kontaktní vrstvy, což je většinou spojováno s nižší viskozitou. Vhodná viskozita hraje důležitou roli zejména při styku s velkými plochými profily, kde se významně objevuje příčná složka vlnění. Vazebná prostředí s vyšší viskozitou nebo doslova pevné spoje, dokážou poskytnout vyšší přenos příčných vln.

Měřicí vybavení a podmínky měření

Pro testovací experiment byly použity čtyři druhy vazebných prostředí:

Glycerín ($C_3H_8O_3$) - bezbarvá viskózní kapalina bez zápachu, je součástí tuků, $\rho=1,26 \text{ g/cm}^3$, $\mu=1,48 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ při 20°C .

Propylenglykol ($C_3H_8O_2$) - viskózní kapalina bez barvy a zápachu, lze získat z glycerinu při výrobě bionafty, $\rho=1,036 \text{ g/cm}^3$.

Ultrasound gel - viskózní gel užívaný jako vazebné prostředí mezi povrchem zkoumaného objektu a ultrazvukem.

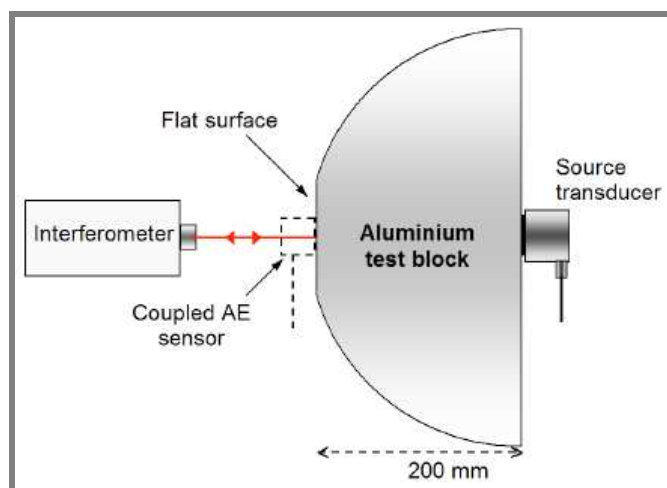
Silicone grease – voděodolná viskózní pasta, složená kombinací silikonového oleje a zahušťovadla.

Pro testování odezvy a citlivosti podélného i příčného vlnění byly vytvořeny dvě soupravy měření. Souprava se skládá z polokulového hliníkového bloku ($D=410 \text{ mm}$) s plochým vrchem o poloměru $R=50 \text{ mm}$ viz obr. 42. Plocha pro testování snímačů je leštěná z důvodu co nejlepšího odrazu laserového interferometru (přístroj pro přesná měření, založený na interferenci/střídání vln) a pro uvažování jako ideálního vazebného povrchu.

Na obrázku vpravo je zobrazen zdroj podélného vlnění (Panametrics V189-RB 0,5 MHz, s průměrem 1,5 palce) upevněný kyanoakrylátem s nastavenou časovou periodou pulsu $1 \mu\text{s}$. Laserový interferometr je zaměřen přímo do osy hliníkového bloku a snímá podélné vlny vycházející z povrchu. Výstup z interferometru je zaznamenáván osciloskopem TDS 5054 s rychlostí vzorkování 25 miliónů-vzorků za

sekundu. Jakmile byla rychlostní historie vlnění z povrchu ustálena, přistoupilo se k opakovanému upevňování snímače PAC S9280 (s předzesílením 40 dB a vysokopásmovým filtrem 20 kHz) na místo předtím snímané laserovým interferometrem s postupně testovaným vazebním prostředím. Ke zpřesnění opakovatelnosti měření a možnosti porovnání byl snímač vždy přitlačován k povrchu silou o velikosti 6 N.

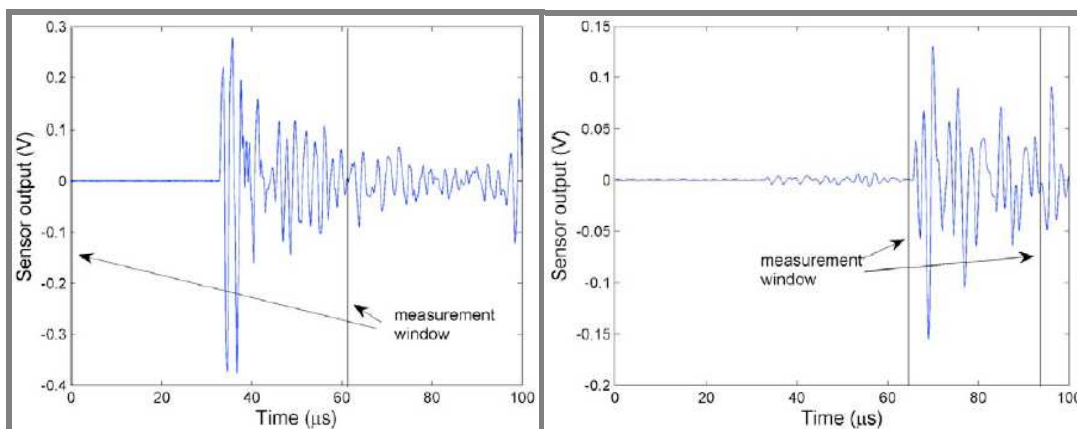
Pro generování příčných vln byl použit zdroj Panametric V152-RB, 0,5 MHz s průměrem 1 palec (25,4 mm) a se stejným uchycením, jako předcházející zdroj vlnění. Pro tuto konfiguraci měření nebylo možné provést kalibraci laserovým interferometrem.



Obr. 42 Schéma použité měřicí aparatury.

Výsledky a diskuze

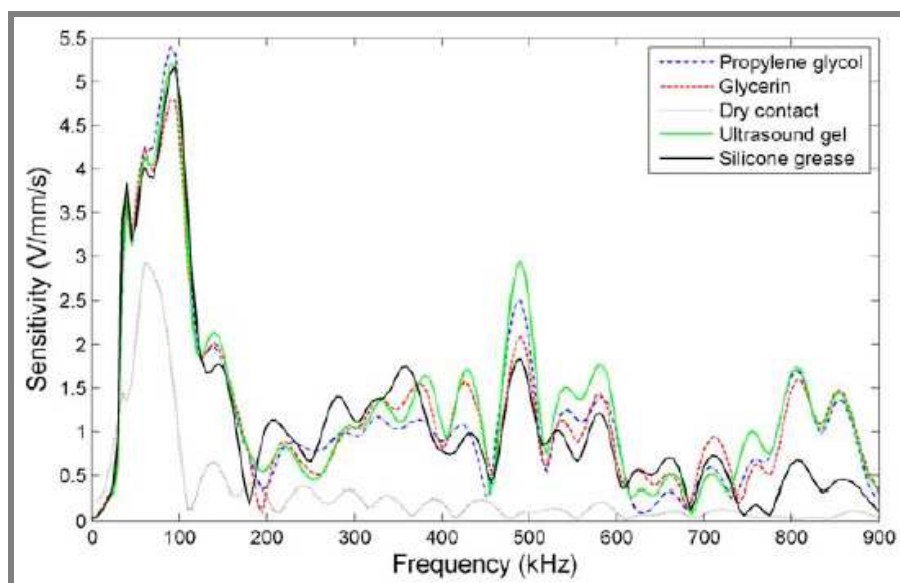
Obr. 43a zobrazuje výstupní napětí senzoru zaznamenávajícího podélné vlny, generované zdrojem vzdáleného 200 mm skrze hliníkový blok. Prvních 32 μs je připisováno době šíření přes blok a v 64 μs už nastává příchod příčných vln. Obr. 43b zaznamenává výběrové okno (od 64 do 96 μs) pro frekvenční analýzu příčných vln, protože do 96 μs je podélná složka vlnění zanedbatelná, ale po této hodnotě přichází první velké vlny.



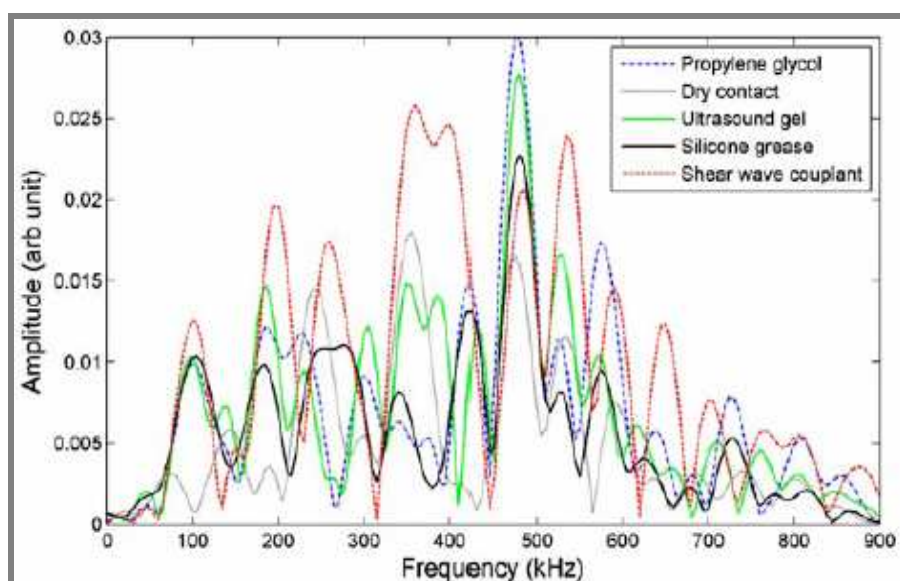
Obr. 43a Časový výstup senzoru pro měření podélného vlnění.

Obr. 43b Časový výstup senzoru pro měření příčného vlnění.

Citlivostní výsledky všech použitých vazebních prostředí na senzoru AE S9208 ukazuje obr. 44, kde citlivost (odvozená od podílu spektra senzoru a signálu interferometru) je zobrazena pro maximální přenesené hladiny signálu, kterého je dané prostředí schopno dosáhnout. Z frekvenční charakteristiky lze přibližně do hodnoty 400 kHz vyčíst jen malé změny u použitých vazeb (odchylka přibližně v rozsahu 5 až 15 %), vyjma samozřejmě suchého kontaktu. Tato nepatrná odchylka může být způsobena odstraněním předchozí a aplikací nové vrstvy testovaného prostředí (drobná kontaminace). V hodnotách nad 400 kHz se nejvýhodněji projevuje *ultrasound gel*, následovaný *propylenglykolem* a *glycerinem*, naopak nejhůře dopadá *silicone grease*. Jak je dále patrné, suchý kontakt vlivem vzduchových bublin redukuje citlivost snímače mnohonásobně více než testované vzorky a to zejména v oblasti od hodnoty 100 kHz a větší.



Obr. 44 Citlivost snímače S9280 pro podélné vlnění různých vazebních prostředí.



Obr. 45 Citlivost snímače S9280 pro příčné vlnění různých vazebních prostředí.

Obr. 45 zobrazuje odezvu frekvenčního spektra senzoru AE S9208 na generování příčného vlnění zdrojem V152-RD za použití suchého styku a vazebních prostředků: *propylene glykol*, *ultrasound gel*, *silicone grease* a speciálně navrženého značně viskózního prostředku (*shear wave couplant*) k vysoké citlivosti detekce příčných vln. Z frekvenčního průběhu jednotlivých vzorků je patrné, že suchý kontakt již není zanedbatelný, jak tomu bylo u odezvy podélného vlnění, dokonce je porovnatelný s vlastnostmi *silicone grease*. Z uvedeného průběhu je možné předpokládat menší citlivost vazebního media k přenosu příčného vlnění a větší citlivost na pevnost spoje, který je pro suchý kontakt charakteristický. Je nutno však připomenout, že povrch hliníkového bloku byl leštěný, což obvykle v praktických aplikacích nebývá. Nejlépe ze vzorků vyšla speciálně utvořená báze, nicméně vynikající odezvu měly i ke své nízké viskozitě *ultrasound gel* a *propylen glycol*.

Závěr

Obecně o zvýšení citlivosti odezvy AE snímačů za použití vhodného vazebního prostředí není jakýchkoli pochyb. Do oblasti 400 kHz není mezi jednotlivými druhy až tak podstatný rozdíl (5 – 15 %), ale při vyšších frekvencích se jako nejvýraznější prostředí vzhledem k přenesenému výkonu jevíly *ultrasound gel* a *propylene glycol*. Použití špatně vybraného prostředí by mohlo způsobit významný pokles rozpoznatelnosti signálu v širokopásmovém a vysokopásmovém měření, ale také by mohlo zapříčinit deformace tvarů vln během měření.

Poznatky pro Disertační práci

Správně zvolené vazebné prostředí hraje bezesporu zásadní roli pro co nejlepší přenos akustického vlnění. V případě styku snímače s povrchem bez použití vhodné přenosové substance je akustická impedance vzduchu přítomného mezi stykovými plochami přibližně $Z_0=413 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ pro 20°C, kterou lze vypočítat ze vzorce (7, 8). Jen pro porovnání, impedance oceli je přibližně $46\cdot 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a například testovaného glycerinu $2,46\cdot 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Z hodnot oceli a glycerinu je už vidět daleko menší rozdíl než u vzduchu.

$$\text{Rovnice (7) a (8): } Z = \frac{p}{v \cdot S} (\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$$
$$Z = \rho \cdot c (\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3})$$

Z – akustická impedance; p – akustický tlak vlny; v a c – rychlost částice (vlnění);
 ρ – hustota prostředí; S - styková plocha

Významnější vliv výběru vhodného prostředí je pozorován ve vyšších frekvenčních oblastech (400 kHz a výše), na druhou stranu použití takzvaného horšího prostředí může vést pouze k menší citlivosti odezvy na generovaný signál. Důležitý požadavek často kladený na správné vazební prostředí je schopnost vytěsňovat z místa styku vzduchové bubliny a teplotní odolnost a stálost při delších zkouškách. Mezi zohledněné faktory patří také vhodná viskozita a dobrá smáčivost substance.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Akustická emise je nedestruktivní metoda zkoušení, která je schopna detekovat aktivní vady v materiálu. Citlivost, kterou tato metoda disponuje, ji vyzdvihuje mezi špičku v oblasti identifikace vzniku poškození a nejen pro včasné zachycení rozvíjejícího poškození, ale i pro možnost lokalizace tohoto poškození (vznik a šíření trhlin, začátek pittingu, projevy nadměrného tření a další).

4.1 Detekce a schopnosti AE při monitorování ložisek

- Vynikající odezva již na velmi malá poškození v porovnání s ostatními používanými diagnostickými metodami.
- Jako jeden z hlavních parametrů nejčastěji užívaný při popisu změn probíhajících v procesu poškozování se jeví RMS – střední kvadratická hodnota signálu.
- AE je schopna detekovat poruchy i u pomaloběžných ložisek značných rozměrů (pohony námořních lodí, otočné podstavy stavebních jeřábů).
- AE prokázala citlivost na celou řadu faktorů ovlivňujících chod ložiska (rychlost otáčení, drsnosti povrchu, viskozita maziva, zatížení a jiné).
- AE je schopna poměrně přesně lokalizovat vznikající poškození (většinou u rozměrnějších součástí, např. kluzná ložiska).

4.2 Využití AE během experimentálních zkoušek

- Používání zrychlených zkoušek (úbytek maziva, větší zatížení, změna geometrie stykových ploch).
- Vznik poškození – uměle naočkované versus přirozené poškození.
- Důležitou roli hraje i přítomnost vhodného vazebného prostředí mezi snímaným povrchem a snímačem AE.

Velmi důležitým poznatkem je informace o možnosti nalezení i jiných parametrů AE, než standardně běžně užívaných parametrů jako jsou například RMS, ASL, či Count, které se používají v časové oblasti záznamu testovacích zkoušek

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Cílem disertační práce je sestavit specifický systém monitorování a vyhodnocování radiálních ložisek pro zjišťování míry stupně poškození metodou akustické emise. V současné době je až na výjimky (**Dristress®** - parametr pro identifikaci poškození firmy Holroyd Instrument) nejčasněji používaným parametrem střední kvadratická hodnota signálu (RMS – Root Mean Square), který poskytuje spíše informaci o celkové intenzitě signálu. V oblasti současné problematiky vývoje měřicích zařízení se výrobci zaměřují na složité systémy, které umožňují zaznamenávání velkého množství informací, s tím je ale spojena vysoká pořizovací cena a velké úložné prostory (místo na disku). Cílem práce je z těchto obsáhlých informací experimentálním způsobem vysledovat parametr, který by více popisoval (byl citlivější na) velikost, případně i charakter vznikajícího poškození na ložisku. Získání tohoto parametru by umožňovalo konstrukci jednodušších měřicích zařízení za nižší pořizovací cenu pro zkoušky ložisek v provozu.

5.1 Dílčí cíle disertační práce

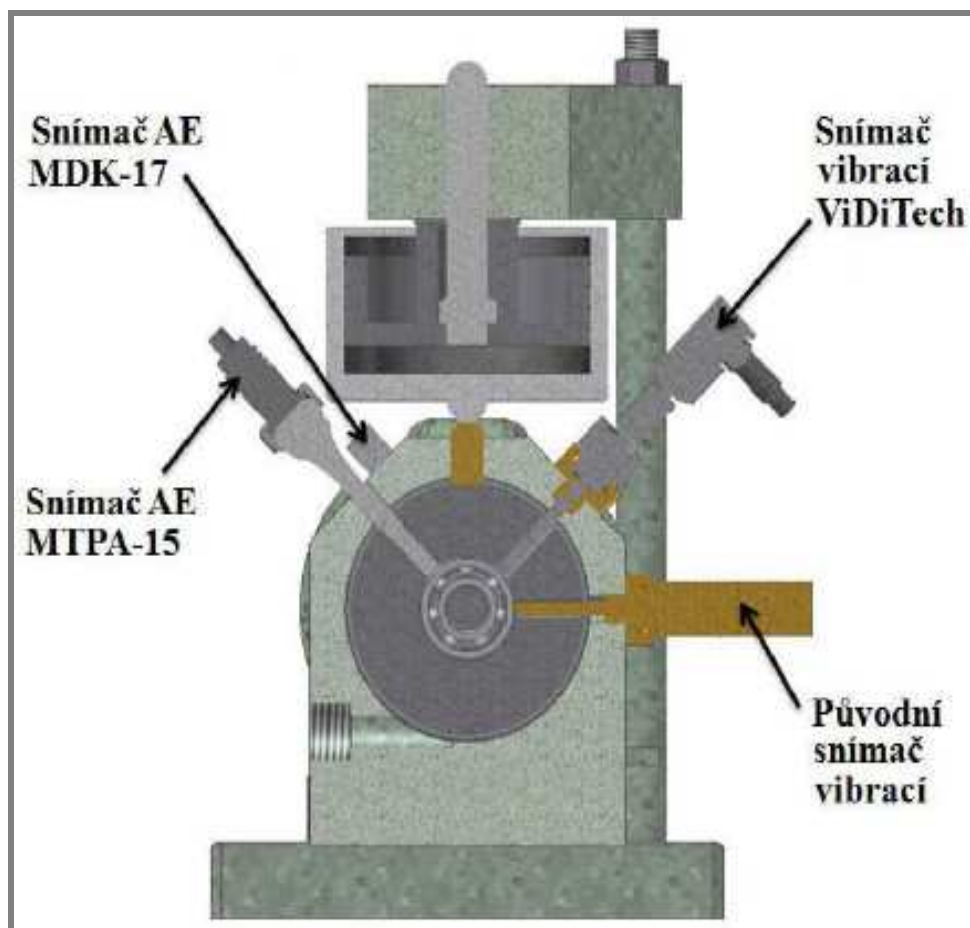
- 1) Zkušební zařízení - Doplnění technické dokumentace stanice SA67 a návrh modifikace zkušebního zařízení pro aplikaci AE a moderního vibračního měření.
- 2) Měřicí vybavení - Výroba a ověření funkčnosti nových prvků (vlnovodů) pro vhodnost snímání zvolenou aparaturou (HW).
- 3) Vývoj SW - Spolupráce s dodavatelem měřicí aparatury na vývoji a modifikacích software pro snímání a vyhodnocování získaných dat.
- 4) Experimentální testování - Před aplikací AE na stanici SA 67 je třeba provést experimentální testování na jednodušších zkušebních stanicích (Axmat, Rmat), kde je sledována odezva systému na vliv poškození. Ověření použitelnosti detekce AE a vibračního sledování na destrukčních zkouškách ložisek. Porovnáním získaných dat z vlnovodu (AE snímána přímo z povrchu ložiska) se signálem získaným z povrchu stanice (tento signál odráží reálnější pohled pro praktické aplikace).
- 5) Výsledek – Nalezení a aplikace parametru AE, co nejlépe charakterizující vznikající poškození, do metodiky měření běžných trvanlivostních zkoušek ložisek, s cílem rychlejší a přesnější identifikace vzniku a rozvoje poškození. Společně s monitorováním AE se předpokládá i snímání vibračního signálu podobně jako AE z vlnovodu (dotyk přímo vnějšího kroužku testovaného ložiska) a z povrchu experimentální zkušební stanice.

Možné doplnění navíc:

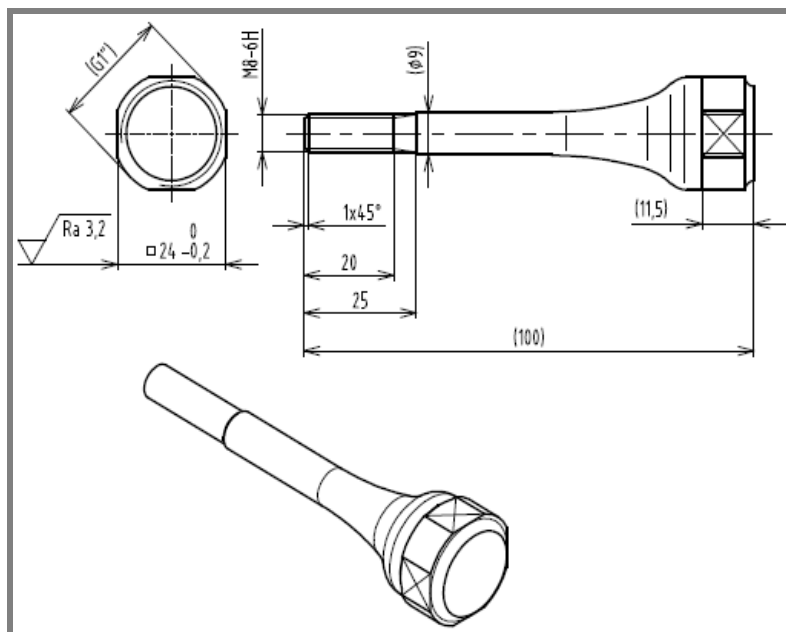
Po vypracování úspěšné metodiky měření by jako doplněk cíle mělo následovat ověření aplikace AE a zjištěných poznatků na strojních zařízeních v provozech a hodnocení kvality mazání ložisek metodou AE.

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

V současné době jsou splněny první dva dílčí cíle zadání, první cíl obsahuje technickou dokumentaci stanice SA67 s doplněnými návrhy modifikace pro snímání AE a moderního vibračního měření, druhým cílem je pak výroba a ověření funkčnosti nových prvků (vlnovodů) pro vhodnost snímání zvolenou aparaturou. Úpravy na stanici SA67 byly provedeny ve spolupráci s Ing. Danielem Suchánkem při řešení jeho diplomové práce: „Úprava zkušebního zařízení ložisek pro aplikaci metody akustické emise“. Provedené úpravy lze detailněji popsat z obr. 46, 47 a 48. Obr. 46 zobrazuje řez modifikovanou stanicí, kde byl nově přidán snímač vibrací (ViDiTech) s vlnovodem podobné konstrukce jako u původního čidla (vibrace, teplota) a vlnovod AE (obr.47). Úpravou ve sledování AE bylo použítí vlnovodu AE dotýkajícího se stejně jako vlnovody od vibračních snímačů vnějšího kroužku testovaného ložiska. Zatímco u měření vibrací jsou vlnovody přitlačovány pružinkou, pro objemnější vlnovod AE bylo použito uchycení závitovým spojením v pouzdru pro testované ložisko (obr.48). Na obrázku je také zobrazen snímač AE (MIDI) umístěný na tělese stanice, pro porovnání výsledků s vlnovodem AE.

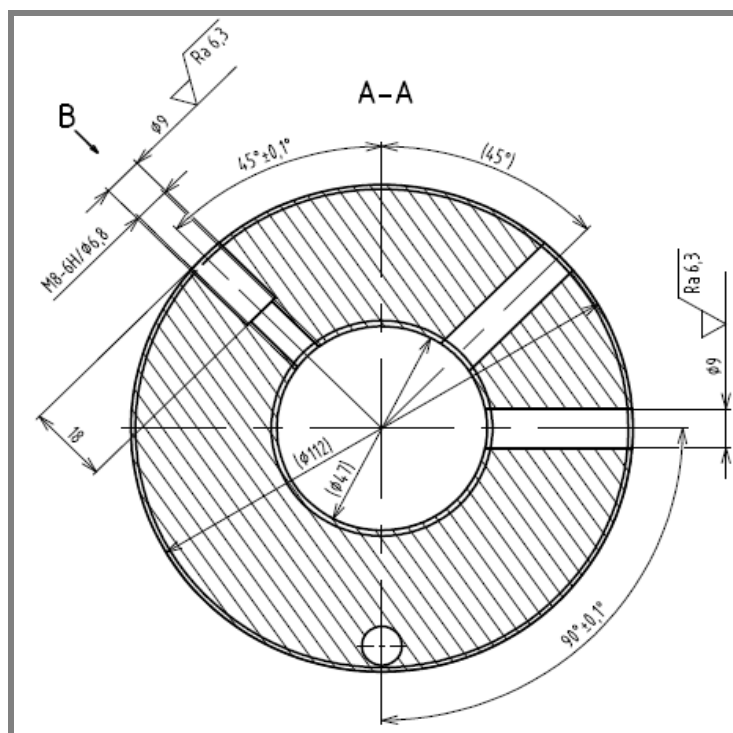


Obr. 46 Pohled řezu upraveným modelem stanice SA67 [18].

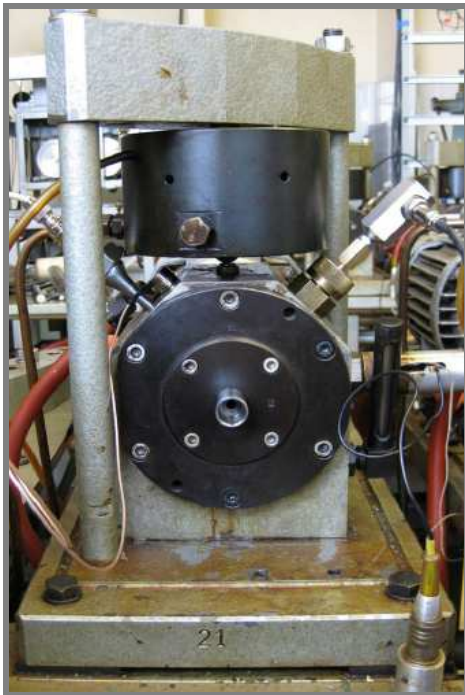


Obr. 47 Vlnovod AE použitý při snímání signálu z povrchu ložiska. [18].

Obr. 47 zobrazuje upravený vlnovod AE pro možnost uchycení testovaného ložiska do pouzdra. Na zakoupeném vlnovodu byl vytvořen závit M8 v délce 20 mm a čtyřhran pro možnost upnutí momentovým klíčem. Na obr. 48 je pohled řezem pouzdra pro uložení testovaného ložiska, uvedené kóty zobrazují úpravy provedené pro průchod a uchycení vlnovodů. Obr. 49 ukazuje pohled na reálnou upravenou stanici SA67, na které byla následným měřením ověřena funkčnost provedených úprav.



Obr. 48 Pouzdro testovaného ložiska s provedenými konstrukčními úpravami [18].



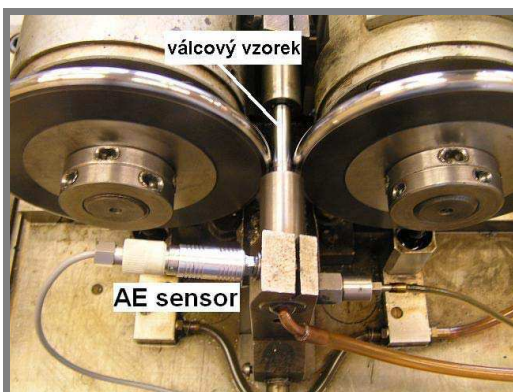
Obr. 49 Upravená stanice SA 67 [18].



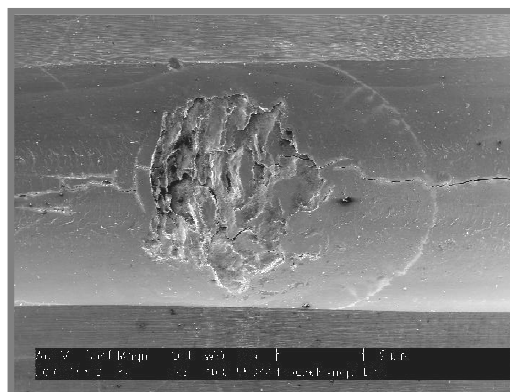
Obr. 50 Klíčový uzel experimentální stanice Axmat.

Nyní probíhá spolupráce s firmou Viditech na modifikacích software určeného pro měření vibrací na stanicích SA67, u kterého je nezbytné vypracovat možnosti vhodných výstupů získaných dat pro následné porovnávání s daty získanými metodou AE.

V současnosti se realizují také kromě základních destrukčních zkoušek na stanici SA67 experimenty na jednodušších stanicích (Axmat a Rmat), kde se ověřuje použitelnost aplikace AE a zjišťují se odezvy AE z těsné blízkosti testovaných vzorků. Obr. 50 zobrazuje klíčový uzel experimentální testovací stanice Axmat, na které je možné testovat kruhové vzorky (nejrůznější materiály, nejčastěji však ložiskové materiály) a při použití vhodné úpravy uchycení i některé typy axiálně zatížených ložisek. Testování probíhá i na radiálně zatížených vzorcích viz. obr. 51, kde je zobrazena stanice Rmat umožňující testování kontaktní únavy radiálně zatížených válcových vzorků.

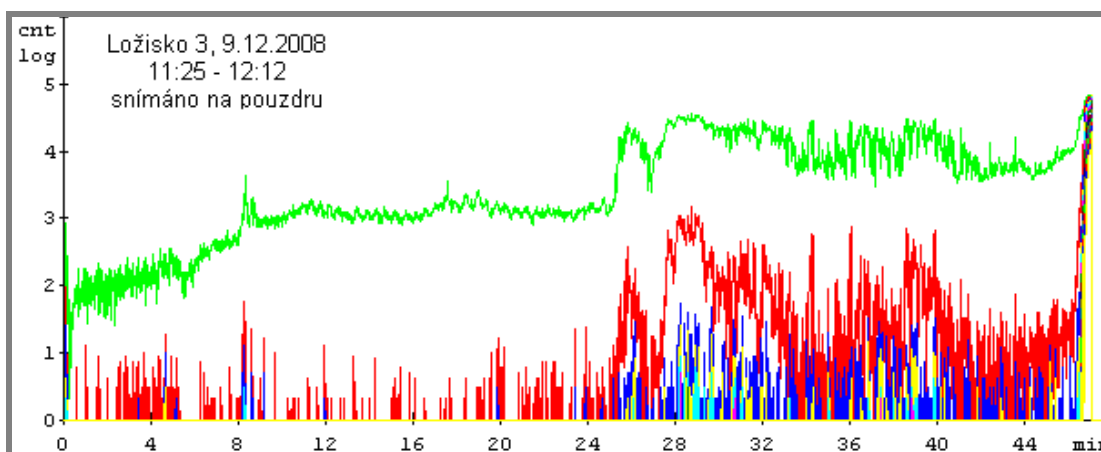


Obr. 51 Experimentální zkušební stanice Rmat.



Obr. 52 Poškození vnější dráhy ložiska.

Prozatím bylo provedeno několik sérií experimentů testování radiálních ložisek 6204 ve formě zrychlených (destrukčních) zkoušek na stanicích SA67. Tyto zrychlené zkoušky jsou ve většině případů zapříčiněny kombinací nadměrného zatížení ložiska radiální silou a změnou podmínek mazání. Úpravou mazání je myšleno vymytí původního maziva ložiska a místo něj použití buď jiného maziva v předem stanoveném rozsahu a nebo specifických olejů (v krajních případech konzervačních olejů). Ukázka výrazného poškození vnějšího kroužku radiálního ložiska je zobrazena na obr. 52, kde došlo z místa vzniku – pittingu k rozšíření trhliny do celého průřezu kroužku.



Obr. 53 Záznam AE zrychlené zkoušky radiálního ložiska ze stanice SA67.

Záznam AE se pořizuje za použití speciálního software (DaeShow& DaeMon) rovněž dodaného firmou ZD Repety. Obr. 53 ukazuje klasický záznam AE, ve kterém je možné sledovat intenzitu signálu až v 16-ti nastavených hladinách. Značná šíře (16 hladin) umožňuje zachytit filtrováním jednotlivých hladin i drobné změny při rozvinutém poškození se značnou intenzitou vyzařovaného signálu. Na tomto konkrétním záznamu, jehož celková doba nepřesáhla 45 minut, je jasně patrný náběh ložiska (0 - 8 min), uklidnění (8 - 24 min) a rozvíjející se poškození až do vzniku radikálního poškození, které bylo ukončeno zvýšenou hladinou vibrací. Obr. 53 ukazuje jen jeden z možných výstupů, který je možný pořídit ze široké škály přicházejících informací z měřicí aparatury.

7 ZÁVĚR

Toto pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje současné dění na poli experimentálního testování zejména valivých ložisek, a to jak ve zkušebních podmínkách, tak i v provozu. Prostudovaná aktuální literatura byla zaměřena především na zjišťování velikosti poškození strojních valivých prvků především metodou AE a vibračními metodami. Vedle identifikace počátku poškození se některé odborné články věnují i nalezení lokalizace místa se vznikajícím defektem. Práce obsahuje i informace o faktorech ovlivňujících jak samotný chod ložiska, jako jsou různé podmínky zatížení, mazání apod., tak i přenos signálu z povrchu zkoumaného povrchu do snímače AE.

Práce kromě úvodu do problematiky, stavu poznání s analýzou poznatků a vymezení cílů práce poskytuje také informace o současném stavu řešení. První část cílů se již podařilo úspěšně splnit a tím je dán předpoklad úspěšného splnění celé disertační práce.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Schematický diagram testovací výbavy.	7
Obr. 2	Špičky amplitud akustické emise s defektem dráhy vnějšího kroužku.	9
Obr. 3	Porovnání monitorovacích technik pro minimální velikost defektu.	10
Obr. 4	Porovnání monitorovacích technik pro maximální velikost defektu.	10
Obr. 5	Záznam napěťových pulsů z defektu dráhy vnitřního kroužku ložiska.	12
Obr. 6	Graf obálky AE spektra pro valivé ložisko.	13
Obr. 7	Závislost velikosti zatížení a rychlosti otáčení na střední hodnotě signálu AE.	13
Obr. 8	Záznam AE ložiska šroubového čerpadla.	14
Obr. 9	Celkový trend vibrační hladiny ložiska čerpadla.	17
Obr. 10	Koroze na vnějším kroužku ložiska.	17
Obr. 11	Celkový trend vibrační hladiny ložiska SKF NU 224.	18
Obr. 12	Frekvenční spektrum se špičkou 90,67 Hz a jejími násobky.	18
Obr. 13	Vibrační signál z 3.10.2001.	19
Obr. 14	Vibrační signál z 11.10.2002.	19
Obr. 15	Vřeteno obráběcího centra s použitými snímači.	20
Obr. 16	Naměřená excentricita na třech vřetenech.	21
Obr. 17	Záznam AE Distress® pro dva převody při 500 ot/min.	21
Obr. 18	Záznam AE RMS pro vyvážené a nevyvážené podmínky.	21
Obr. 19	Záznam vibračního zrychlení v axiálním i radiálním směru měření.	22
Obr. 20	Geometrie testovaných válců a schematický diagram sběru dat.	23
Obr. 21	Poměr počtu zásahů AE / min a zrychlení vibrací během testu.	24
Obr. 22a	Záběhový stav.	25
Obr. 22b	Ustálený stav.	25
Obr. 23	10 minut před ukončením zkoušky.	25
Obr. 24	Morfologie poškození povrchu.	25
Obr. 25	Pohled na průřez poškození hnaného válce.	26
Obr. 26	Ukázka testovaného ložiska.	27
Obr. 27	Lokalizační diagram AE aktivity.	28
Obr. 28	Frekvenční spektrum záznamu poškozeného ložiska pro 2 s vzorek (2 otáčky).	28
Obr. 29	Ukázka poškození kroužku ložiska (FALSE BRINELLING).	29
Obr. 30	Testovací stanice s detaily jednotlivých částí.	30
Obr. 31	Část tabulky obsahující data pro případovou studii I.	31
Obr. 32	Graf průběhu studie I se všemi sledovanými parametry v závislosti na čase.	32
Obr. 33	Standardní sledované AE parametry v závislosti na čase v průběhu zkoušky.	33
Obr. 34	Výsledné poškození testovaného kroužku.	33
Obr. 35	Lokalizace poškození testovaného kroužku případové studie I.	34
Obr. 36a	Závislost energetických ztrát na počtu otáček pro různě stanovená zatížení.	37
Obr. 36b	Průběh energetických ztrát na změnu zatížení při konstantních otáčkách.	37
Obr. 37a	Průběh energetických ztrát na počtu otáček pro různé drsnosti povrchu.	37
Obr. 37b	Průběh energetických ztrát na počtu otáček pro různě viskózní maziva.	37
Obr. 38a	Závislost energetických ztrát na velikosti viskozity maziva.	37

Obr. 38b	Závislost rychlosti otáčení hřídele na velikosti viskozity maziva.	37
Obr. 39a	Průběh počtu událostí AE v závislosti na rychlosti otáčení hřídele.	38
Obr. 39b	Porovnání průběhu záznamu AE (counts) s vibracemi v závislosti na otáčkách hřídele.	38
Obr. 40	RMS pro rozdílné rozsahy frekvenčních filtrů – ložisko bez defektu.	40
Obr. 41	Sumační rozdělení AE zásahů ve snímaném frekvenčním rozsahu.	41
Obr. 42	Schéma použité měřicí aparatury.	43
Obr. 43a	Časový výstup senzoru pro měření podélného vlnění.	43
Obr. 43b	Časový výstup senzoru pro měření příčného vlnění.	43
Obr. 44	Citlivost snímače S9280 pro podélné vlnění různých vazebních prostředí.	44
Obr. 45	Citlivost snímače S9280 pro příčné vlnění různých vazebních prostředí.	44
Obr. 46	Pohled řezu upraveným modelem stanice SA67 [18].	48
Obr. 47	Vlnovod AE použitý při snímání signálu z povrchu ložiska. [18].	49
Obr. 48	Pouzdro testovaného ložiska s provedenými konstrukčními úpravami [18].	49
Obr. 49	Upravená stanice SA 67 [18].	50
Obr. 50	Klíčový uzel experimentální stanice Axmat.	50
Obr. 51	Experimentální zkušební stanice Rmat.	50
Obr. 52	Poškození vnější dráhy ložiska.	50
Obr. 53	Záznam AE zrychlené zkoušky radiálního ložiska ze stanice SA67.	51

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AE	-	akustická emise
ASL	-	průměrná hodnota amplitudy signálu akustické emise
Axmat	-	experimentální zkušební stanice pro axiálně zatížené vzorky
Counts	-	počty překmitů přes nastavené prahové úrovně
Duration	-	doba trvání události
Dristress®	-	parametr pro identifikaci poškození (Holroyd Instrument)
FFT	-	Fast Fourier Transform
Hits	-	počet překmitů přes nastavené prahové úrovně
Pitting	-	kontaktní poškození povrchu
Rmat	-	experimentální zkušební stanice pro válcové vzorky
SA67	-	experimentální zkušební stanice pro radiální ložiska
SPM	-	metoda rázových pulsů
c	m.s ⁻¹	rychlost šíření zvuku
C	m	ložisková vůle
d	mm	průměr valivých elementů
D	mm	roztečný průměr valivých elementů v ložisku
F	N	radiální zatížení
f_{bng}	Hz	vibrační frekvence v napět'ovém spektru
f_e	Hz	elektrická napájecí frekvence
f_v	Hz	charakteristická vibrační frekvence
L	mm	šířka ložiskového kroužku
m	-	proměnná intervalu (1 – 3)
n	ot.s ⁻¹	rychlost otáčení hřídele
N_b	-	počet valivých elementů
p	Pa	akustický tlak
R	mm	poloměr hřídele
RMS	mV	střední kvadratická hodnota signálu
R_z	μm	drsnot povrchu určená největší výškou profilu
S	m ²	styková plocha
W_c	Hz	frekvence defektu klece
W_b	Hz	frekvence defektu valivého elementu
W_{bp}	Hz	frekvence defektu vnějšího kroužku
W_{bpi}	Hz	frekvence defektu vnitřního kroužku
Z	kg.m ⁻² .s ⁻¹	akustická impedance prostředí
α	°	stykový úhel kuličky s ložiskovými kroužky
μ	Pa.s	dynamická viskozita za normální teploty
v	m.s ⁻¹	rychlost kmitání hmotných částic (vlnění)
ρ	kg.m ⁻³	hustota prostředí
σ	m	součinitel drsnosti

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOPEC, B., a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, vydání první, CERM, s.r.o. Brno, 2008, ISBN 978-80-7204-591-4
- [2] GROSSE, CH. U., OHTSU, M.: History and fundamentals. In: ACOUSTIC EMISSION TESTING, Basic for research – Application in civil engineering, Springer Berlin Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-69895-1
- [3] YOON, D.J., KWON, O.Y., CHUNG, M.H., KIM, K.W.: Early detection of damages in journal bearings by acoustic emission monitoring. In: JOURNAL OF ACOUSTIC EMISSION, Volume: 13, Pages: 1-10, ACOUSTIC EMISSION GROUP, ETATS-UNIS, CA, USA, 1995, ISSN 0730-0050.
- [4] DROUILLARD T.F.: A history of acoustic emission. In: JOURNAL OF ACOUSTIC EMISSION, Volume: 14, Pages: 1-34, ACOUSTIC EMISSION GROUP, ETATS-UNIS, CA, USA, 1996, ISSN 0730-0050.
- [5] HORT, F.- VLAŠIC, F.- MAZAL, P.: Vybrané aplikace metody AE v Ústavu konstruování FSI VUT v Brně. In: 49.Int.Conf. KCMS 2008, 8.-10.9.2008, Srní, p. 87-90, ZČU Plzeň, ISBN 978-80-7043-718-6.
- [6] TIMMERMAN H.: Monitoring the winds of change. In: EVOLUTION, Business and technology magazine from SKF, Volume 3, Pages: 21 – 24, SKF Business & Technology Park, Nieuwegein, Netherlands, 2006, online <http://evolution.skf.com/zino.aspx?articleID=14982>.
- [7] ZOLADZ. T., EARHART. E., FIORUCCI. T.: Bearing defect signature analysis advanced nonlinear signal analysis in a controlled environment. In: NASA Technical Memorandum 108491, Pages: 38, U. S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE, 1995, 633 - 109 / 20043.
- [8] TANDON, N., YADAVA, G.S., RAMAKRISHNA, K.M.: A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings. In: MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, Volume: 21, Issue:1, Pages: 244-256, ITMME Centre, New Delhi, INDE, 2005, ISSN 0888-3270.
- [9] HOLROYD, T., J.: Acoustic Emission as a basis for the condition monitoring of industrial machinery. Pages: 8, HOLROYD INSTRUMENTS LTD., Matlock, DE4 2AJ, UK, online: 25.6.2009 <http://www.holroyd-instruments.co.uk/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/paper.pdf>.
- [10] ORHAN, S., AKTÜRK, N., VELIK, V.: Vibration monitoring for detect diagnosis of rolling elements bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies. In: NDT&E International 39, Pages: 293 – 298, 2006.
- [11] RUUSKA, M., ANDERSON. P.H.: Spindle bearing monitoring using acoustic emission. In: XVII IMEKO WORLD CONGRES PROCEEDINGS, Pages: 2164 – 2167, Dubrovnik, CROATIA, 2003.

- [12] RAHMAN, M.Z., OHBA, H., YAMAMOTO, T., YOSHIOKA, T.: A study on incipient damage monitoring in rolling contact fatigue process using acoustic emission. In: TRIBOLOGY TRANSACTIONS, Volume: 51, Issue: 5, Pages: 543 – 551, STLE, JAPAN, 2008, ISSN 1040-2004 print /1547-397X online.
- [13] ROGERS, L. M.: Detection of incipient damage in large rolling element bearings. In: ADVANCED MATERIALS RESEARCH, Volume: 13-14, Pages: 37 – 44, TRANS TECH PUBLICATIONS, SWITZERLAND, 2006, online at <http://www.scientific.net>.
- [14] ELFORJANI, M., MBA D.: Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in slow speed rolling element bearing with acoustic emission. In: JOURNAL OF VIBRATION AND ACOUSTICS-TRANSACTIONS OF THE ASME, Volume: 130, Issue: 4, Pages: 14, ASME, USA, 2008, ISSN 1048-9002.
- [15] Huang, Q., Li, L., Rao, H., Jin, F., Tang, Y.: The AE law of sliding bearings in rotating machinery and its application in fault diagnosis. In: CHALLENGES OF POWER ENGINEERING AND ENVIRONMENT 2007, Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Volume: 1, Pages: 5414-5446, Springer Berlin Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-76694-0 (Online).
- [16] BARAN, I., NOWAK M., DARSKI, W.: Application of acoustic emission in monitoring of failure in slide bearings. In: JOURNAL OF ACOUSTIC EMISSION, Volume: 25, Pages: 341-347, ACOUSTIC EMISSION GROUP, Encino CA, USA, 2007, ISSN 0730-0050.
- [17] THEOBALD, P., ZEQRIRI, B., AVISON, J.: Couplants and their influence on AE sensor sensitivity. In: JOURNAL OF ACOUSTIC EMISSION, Volume: 26, Pages: 91-97, ACOUSTIC EMISSION GROUP, Encino CA, USA, 2008, ISSN 0730-0050.
- [18] SUCHANEK, D. *Úprava zkušebního zařízení ložisek pro aplikaci metody akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, 68 s., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

