

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

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

Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek

Application of Acoustic Emission Method for More Detailed Diagnostics of Radial Bearings Damage

Dizertační práce
Dissertation Thesis

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

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

ABSTRAKT

Dizertační práce se zabývá studiem možnosti využití metody akustické emise, jako nástroje pro zpřesnění identifikace vzniku poškození radiálních ložisek. Práce obsahuje porovnání různých metod hodnocení poškození ložisek při laboratorních zkouškách. Dále je zohledněno i použité vazebné prostředí mezi stykovými plochami snímačů a snímaných povrchů. Praktická část zahrnuje představení experimentální stanice a provedených konstrukční úprav. Hlavní část práce tvoří podrobně rozebrané příklady tří typů experimentálních zkoušek, které simulují možné poruchy ložisek a jejich projevy ve snímaném signálu. Součástí je také vypracovaná metodika zkoušení s doporučenými hodnotami pro nastavení společného měření signálu AE, vibrací a teploty.

ABSTRACT

This thesis studies the possibilities of exploiting the acoustic emission method as a tool for more detailed identification of the radial bearings damage formation. The work includes comparison of different evaluation methods in laboratory tests. Applied couplant between the contact sensor areas and sensing surfaces is also taken into account. The practical part includes the presentation of the experimental station and structural adjustments made. The main part of the work comprises the examples in detail of three types of experimental tests that simulate the possible failure of bearings and their manifestation in the sensing signal. Testing methodology developed with recommended values for setting common AE signal measurement, vibration and temperature is a part of the thesis, too.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akustická emise, ložisko, kontaktní únava, vazebné prostředí, pitting

KEY WORDS

Acoustic emission, bearing, contact fatigue, couplant, pitting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORT, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem předloženou dizertační práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele doc. Ing. Pavla Mazala, CSc.

V Brně dne 30. 8. 2011

.....
Filip Hort

PODĚKOVÁNÍ

Předně bych rád poděkoval svému školiteli doc. Pavlu Mazalovi za mnoho cenných rad a připomínek při řešení této dizertační práce a podporu během doktorského studia. Děkuji také svým rodičům a své ženě, kteří mi byli během celého studia vždy velkou oporou.

OBSAH**OBSAH**

1	ÚVOD	9
1.1	Formulace řešeného problému	9
2	PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY	10
2.1	Historie	10
2.2	Základní princip akustické emise	11
2.3	Analýza signálu	13
2.3.1	Vyhodnocování signálu v časové oblasti	13
2.3.2	Vyhodnocování signálu ve frekvenční oblasti	15
2.3.3	Zhodnocení analýzy signálu AE	18
2.3.4	Aplikace AE v monitorování ložisek	19
2.3.5	Porovnávání citlivosti detekce metod na přítomnost defektu	19
2.3.6	Zhodnocení diagnostických metod	32
2.4	Detekce a lokalizace poškození	34
2.4.1	Detekce poškození axiálních ložisek	34
2.4.2	Diagnostika velkých ložiskových elementů	37
2.4.3	Detekce a lokalizace kontaktní únavy válcových těles	39
2.4.4	Zhodnocení lokalizačních postupů	42
2.5	Vazebné prostředí	42
2.5.1	Rozbor a analýzy vazebných prostředí	42
2.5.2	Zhodnocení vazebných prostředí	47
2.6	Poškození ložisek	48
2.6.1	Uměle vytvořené poškození	48
2.6.2	Přírozně vytvořené poškození	48
2.6.3	Životnost ložiska	50
2.6.4	Trvanlivost	50
3	CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE	52
4	EXPERIMENTÁLNÍ APARATURA	53
4.1	Zkoušky životnosti radiálních ložisek	53
4.2	Popis a úprava experimentální stanice SA67	54
5	VÝSLEDKY DIZERTAČNÍ PRÁCE	58
5.1	Standardní zkoušky životnosti radiálních ložisek - experiment I	58
5.1.1	Nastavení měřicího řetězce AE	58
5.1.2	Analýza výsledků měření v časové oblasti	59
5.1.3	Analýza výsledků měření vibrací a teploty v časové oblasti	66
5.1.4	Analýza výsledků AE ve frekvenční oblasti	67
5.1.5	Výsledné poškození ložiska	69
5.2	Zrychlené zkoušky životnosti radiálních ložisek – experiment II	72
5.2.1	Analýza výsledků měření v časové oblasti	72
5.2.2	Uměle vytvořené poškození dráhy vnitřního kroužku	73
5.2.3	Analýza výsledků měření ve frekvenční oblasti	75
5.3	Zrychlené zkoušky životnosti radiálních ložisek - experiment III	79
5.3.1	Aparatura použitá pro záznam zrychlené (destrukční) zkoušky	79
5.3.2	Nastavení vstupních parametrů a podmínek pro zkoušení	80
5.3.3	Analýza výsledků měření v časové oblasti	80
5.3.4	Analýza poškození ložiska zrychlenou zkouškou	80

5.3.5	Analýza výsledků ve frekvenční oblasti	82
5.4	Analýza a zhodnocení poznatků z výsledků experimentální části	85
5.4.1	Experiment I	85
5.4.2	Experiment II	85
5.4.3	Experiment III	86
5.5	Význam nových získaných poznatků	86
6	ZÁVĚR	87
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	89
8	SEZNAM TABULEK	92
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	93
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	95
11	PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE – VÝBĚR	99
12	SEZNAM PŘÍLOH	100

1 ÚVOD

1

Metoda akustické emise (AE) je založená na fyzikální podstatě detekce elastické napětíové vlny, která se šíří v materiálu tělesa, nebo po jeho povrchu. Tyto napětíové vlny jsou generovány vlivem plastických deformací v materiálu, který je vystaven vnějším vlivům (mechanické namáhání, tepelné namáhání). Metoda AE je ale využívána také k identifikaci a zaznamenávání průběhů jiných typů poškození a procesů, kterými mohou být: úniky medií z tlakových zařízení emitující akustický šum, poškozování materiálů a konstrukcí (přítomností rázů, či tření) a nebo výrobně technologických procesů (svařování, obrábění, tváření, ...). Snad největší rozmach zaznamenává metoda AE v oblasti lokalizace poškození, zejména při tlakových zkouškách, nebo lokalizaci únavových trhlin cyklicky namáhaných součástí.

S nástupem moderní výpočetní techniky jsou prohlubovány i možnosti aplikace metody AE při monitorování složitých strojních uzlů. Jedněmi z takových konstrukčních prvků mohou být i valivá ložiska, u kterých dochází k poškozování zejména vlivem kontaktního cyklického namáhání valivých povrchů. Poruchy ložisek v provozních podmínkách ovlivňují, ať už přímo nebo nepřímo, kvalitu výsledných produktů. Poruchy mají neblahý vliv na jakost výroby a mohou být různého charakteru, od klasického únavového poškození, jako je vznik dolíčkového opotřebení (pittingu), přes nedostatečné mazání ložiska, až v krajním případě po přítomnost výrobní vady. V dnešní době jsou kladeny stále vyšší nároky na udržení spolehlivosti chodu strojních zařízení (například v energetickém průmyslu), kde jsou údržbové práce plánovány na nejzazší možné termíny, popřípadě je nutné zaručit chod zařízení do plánované odstávky. Odhalit tak počátek vznikajícího poškození s dostatečným předstihem je velice důležité.

Jedním z významných problémů spojených se zkoušením ložisek za zrychlených podmínek je volba co nejvhodnějšího přístupu, který by odrážel relevantnost výsledků vzhledem ke klasickému projevu únavového poškození. V současné době se využívá zejména snímání odezvy signálu z uměle vytvořeného poškození o definovaných rozměrech. Dizertační práce se rovněž věnuje i této problematice a dokládá výsledky zaměřené na charakter a vznik poškození u těchto zrychlených zkoušek.

1.1 Formulace řešeného problému

Při řešení zadaného problému je nejprve nutné odhalit, zda vybraná metoda přináší něco nového, čím se vyznačuje a čím předchází ostatní metody při aplikaci na vytyčený problém. Dizertační práce by se měla pokusit objasnit následující otázky, které by mohly posunout vědecké poznatky zase o krok dále.

** Je metoda AE vhodnou metodou pro diagnostiku strojních součástí jako jsou valivá ložiska?*

** Je možné odhalit počátky poškození valivých ložisek přesněji a dříve s využitím nových vyhodnocovacích aparatur s detailnějším záznamem signálu?*

** Lze vyznačit některé parametry metody AE, které výrazněji reagují na vznik poškození a uchovávají si vypovídající schopnost i při snímání ze vzdáleného místa od poruchy?*

** Jaký postup při zkoušení zrychlených zkoušek je vhodné použít, aby byly zachovány co nejvěrohodnější výsledky vzhledem k reálnému vzniku poškození?*

2 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY

2.1 Historie

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, následné elektronické zpracování detekovaného signálu AE a konečně též vyhodnocení parametrů detekovaného signálu. První systematické práce v této oblasti jsou datovány do 50. let 20. století a jsou spojeny se jménem německého fyzika Josefa Kaisera“ [1].

Přestože je začátek AE připisován do 50. 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 (Kishinoue 1934) se popisuje průběh rázů při ohybovém namáhání dřevěných vzorků. Článek přeložil do angličtiny K. Ono a byl publikován v časopise *Journal of Acoustic Emission* roku 1990 [2]. Při tomto experimentu se jako snímací čidlo použila jehla vložená do tažné části vzorku. 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 (Drouillard's overview 1996), experimenty byly prováděny na kruhových (drátových) vzorcích z Ni ocelí, za účelem detekování změn snímaného signálu při martenzitické přeměně (kalené oceli). Tyto experimenty mohl provádět díky sestavenému elektrodynamickému senzoru, přeměňujícím mechanické vibrace na elektrické napětí (byl jedním z prvních, kdo vyvinul systém pro snímání a vyhodnocování, který je prakticky užíván dodnes). Pro svoji značnou citlivost byla tato měření využívána ke sledování mikroseizmické aktivity, zejména v důlní činnosti, kde hrozí extrémní riziko zavalení a posuvů kamenných mas (Leopard A. Obert 1941, 1942). Generováním AE aktivity ve vztahu ke vzniku zemětřesení se dále zabýval Mogi (1962) [2], [3], [4].

Jak již bylo zmíněno, oficiální začátek historie AE se datuje od roku 1950, kdy Josef Kaiser publikoval svoji dizertační 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 metodou AE zaměřilo na zkoumání vlastností nejrůznějších materiálů, zejména se však uplatňovala ve stavebním inženýrství [4].

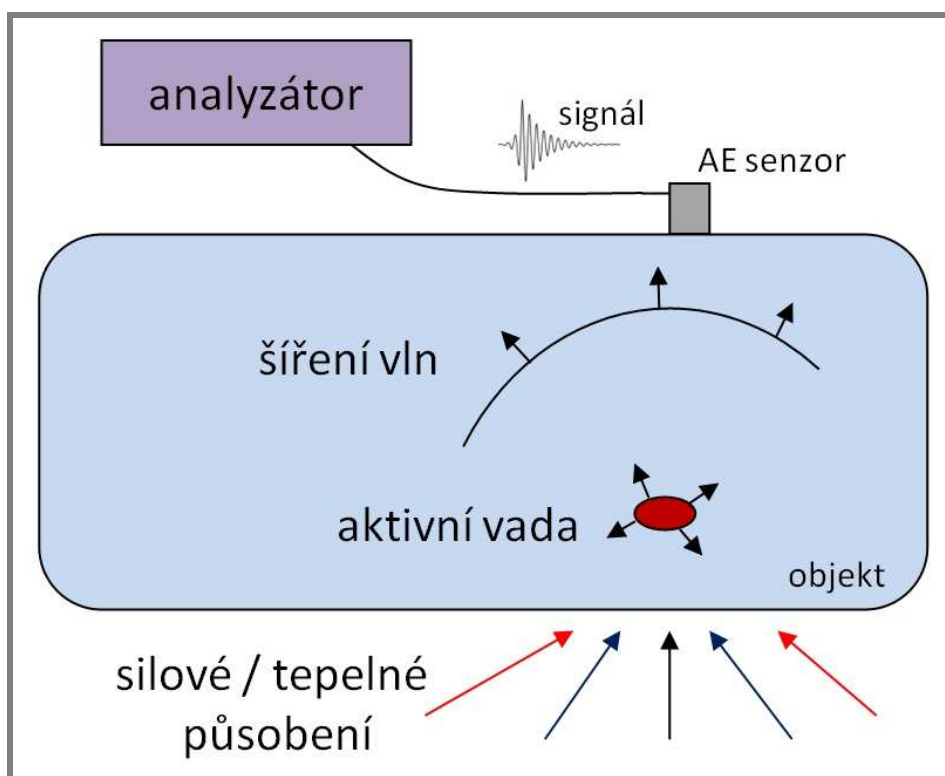
První zmínky o aplikaci AE, jako nástroje pro diagnózu ložiska, jsou datovány k roku 1969, kdy Harvey L. Balderston uveřejnil článek nazvaný *Detekce počátečního poškození ložisek*. Balderston uvedl tři hlavní jevy: zvuk při otáčení, rezonanční frekvence a akustickou emisi. V sedmdesátých letech se utvářel 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, která se podílela 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) [5], [6].

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

2.2 Základní princip akustické emise

2.2

Akustická emise (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 měřícím a vyhodnocovacím zařízení, viz obr. 2.1.

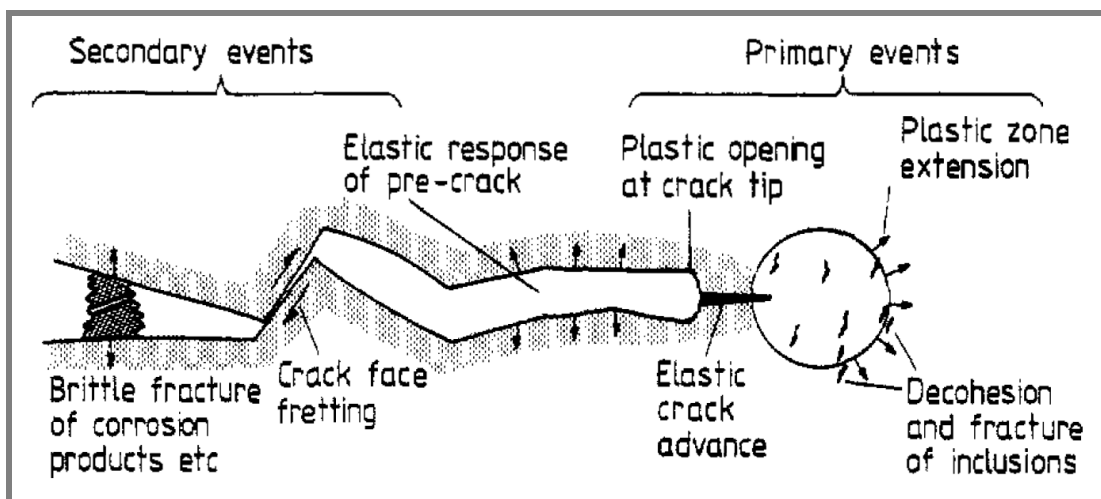


Obr. 2.1 Zjednodušené schéma vzniku a detekce elastických vln v materiálu.

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 diagnostikovaného zařízení (zkoušky tlakových nádob). Mezi další výhody patří například možnost kontinuálního snímání, které má vysokou šanci zaznamenat časový okamžik vzniku vady a její následný 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 značně velká citlivost metody. Citlivost k vnějšímu rušení a nutnosti nalezení

požadované informace obvykle ve značném šumu okolních provozních podmínek. Velkou nevýhodou, zvláště při opakovaných měřeních s velkou periodou, může být jistá unikátnost metody. Nastavení stejných podmínek měření je značně obtížné, mnohdy až nemožné [1], [7].

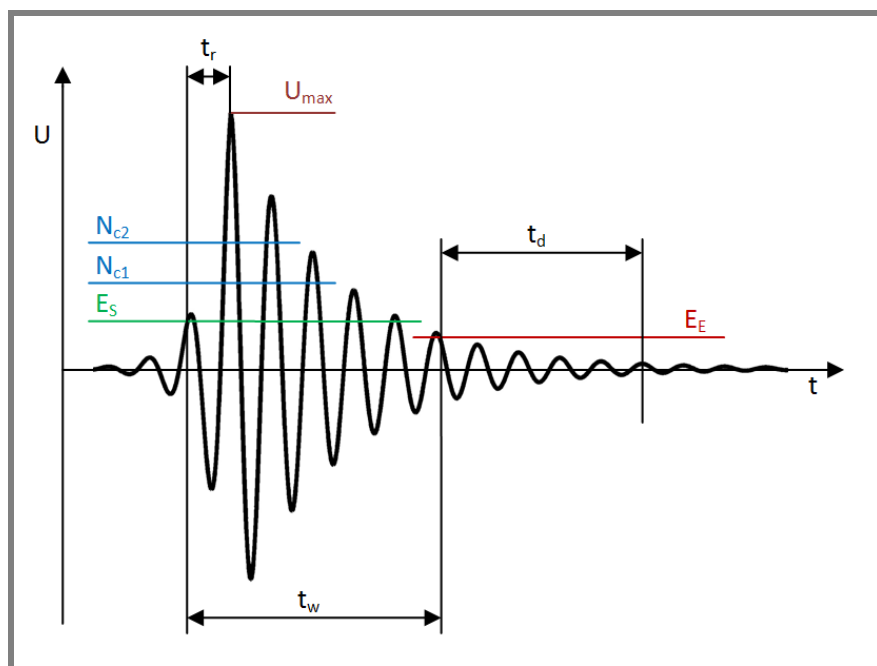
Obrázek 2.2 zobrazuje princip vzniku primárních a sekundárních událostí elastických vln, vznikajících při růstu a formování trhliny v materiálu. Primární složka vzniku událostí přísluší místu čela trhliny, kde dochází k plastickým deformacím, praskání po hranicích zrn, tvorbě dislokací a následně trhliny, také sem patří elastická složka napětí při namáhání generovaná čelem trhliny. Do sekundární části patří elastické odezvy materiálu v místě před čelem trhliny, dále vzájemné tření stěn trhliny, ale také například křehké lomy vznikající ve vyústění trhliny, které jsou způsobené korozním prostředím pod zatížením. Zatímco detekovat primární události z místa čela trhliny je v dnešních podmínkách velice obtížné (přibližný čas, za který trhlina poporoste je $< 1 \mu s$), pro určení přítomnosti vady, jako je například trhlina, se výhodně užívá generace četnějších a delších událostí právě ze sekundární oblasti [8].



Obr. 2.2 Primární a sekundární zdroj událostí spojených se vznikem a růstem trhliny [8].

Obrázek 2.3 zobrazuje ukázkou hitu (události AE) nespojitého (praskavého - Burst) signálu AE, kde jednotlivé parametry jsou definovány takto:

- N_{c1} – první prahová hodnota amplitudy signálu (Count)
- N_{c2} – druhá prahová hodnota amplitudy signálu
- N_{cn} – n-tá prahová hodnota amplitudy signálu
- E_S – nastavený práh pro začátek vzorkování hitu události AE
- E_E – nastavený práh pro ukončení vzorkování hitu události AE
- t_w – doba trvání signálu
- t_d – doba trvání mrtvé doby
- U_{max} – maximální amplituda signálu
- t_r – doba náběhu signálu od prahové hodnoty E_S po maximální amplitudu signálu (U_{max})



Obr. 2.3 Ukázka hitu AE (nespojitého signálu - Burst).

Počet prahových hodnot může být zvolen libovolně (1, 2, nebo i 16). Po překročení prahové hodnoty začne systém ukládat počet překmitů. Podle počtu nastavených hladin (prahových hodnot) lze lépe nastavit citlivost pro porovnávání intenzity získaného signálu. Parametry N_{cn} tedy charakterizují hladiny pro detekci amplitudových překmitů signálu.

Zachycení (navzorkování) nespojitého hitu je prováděno následovně: v okamžiku překmitu amplitudy signálu AE přes nastavený práh E_s dojde ke vzorkování signálu nastavenou vzorkovací frekvencí. Vzorkování hitu je ukončeno v okamžiku posledního překmitu amplitudy signálu přes práh E_E . Této možnosti ukončení se využívá u nespojitě emise a poslední překmit je výsledován odečtením mrtvé doby (t_d) od celkového času hitu ($t_w + t_d$). V případě spojitě emise je délka hitu určena uživatelem definovanou maximální hodnotou. Nastavení prahových hodnot závisí na několika faktorech, jako jsou nastavená citlivost, dynamické změny odezvy systému během měření (rozsah) a zejména na zkušenosti obsluhy měření. Nastavení prahů pro začátek a konec hitu může být zadáno také pouze jedinou hodnotou.

Další z důležitých parametrů popisující charakter hitu je maximální amplituda signálu (U_{max}), které daný hit dosáhne. Doba od překročení prahu E_s do U_{max} je stanovena jako doba náběhu (*risetime* t_r). Signál AE lze vyhodnocovat jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti, časová oblast je méně náročná na zpracování a na použitý HW techniky.

2.3 Analýza signálu

2.3.1 Vyhodnocování signálu v časové oblasti

Vedle základních parametrů vyhodnocování signálu AE (*Counts*, *Events*, *RMS*, ...) jsou obecně náhodné signály hodnoceny střední hodnotou μ , rozptylem D , činitelem výkyvu *CF* (*Crest Factor*), korelační funkcí (R_{xx} – *hodnocení závislosti signálu ve dvou různých časových okamžicích*). Mezi základní parametry signálu AE patří vyhodnocování počtu překmitů přes nastavené prahové úrovně signálu (*Counts* –

2.3

2.3.1

časová četnost překmitů). Jedná se o základní informaci o síle aktivity AE (2.1), s použitím více prahových hodnot lze přesněji nastavit citlivost pro vyhodnocování a porovnávání naměřeného signálu s ostatními získanými záznamy.

$$\dot{N}_C = \frac{dN_C}{dt} \quad (2.1)$$

Téměř nejčastěji používaným parametrem signálu je *RMS* (*Root Mean Square*), což je efektivní hodnota signálu, definovaná jako součet kvadrátů úrovně signálu $u(t)$ v časovém intervalu ΔT (2.2). Dalším parametrem, který lze vyhodnocovat v časové oblasti je střední úroveň signálu ASL (3.3) jako obálky špiček, což je možné využít zejména u spojitého signálu AE, ve kterém se objevují ojedinělé špičky.

$$RMS^2 = \frac{\int dN_C}{\Delta T} = \left(\frac{ENERGIE}{\Delta T} = VÝKON \right) \quad (2.2)$$

$$ASL = 20 \frac{\int \log_{10}(|u(t)|) dt}{\Delta T} \quad (2.3)$$

Hity AE je možné popsat v časové oblasti dalšími důležitými parametry, jako je četností emisních událostí (hitů) (2.4), dále i kumulativní četností, nebo maximální amplitudou (2.5), která může relativně dobře napovědět při hledání detekce poškození během analýzy nasnímaných dat. V souvislosti s maximální amplitudou je zaznamenáván a vyhodnocován parametr t_r a tyto hlavní parametry hitu uzavírá doba trvání signálu (t_w).

$$\dot{N}_E = \frac{dN_E}{dt} \quad (2.4)$$

$$U_{\max} = \max(u(t)) \quad (2.5)$$

Jedním z nezávislých parametrů hodnocení poškození ložiska je tzv. *Crest faktor* (2.6), který je definován jako poměr maximální amplitudy (2.5) k efektivní hodnotě (2.2). Tento faktor je citlivý zejména v raném stádiu vzniku poškození.

$$Crest = \frac{U_{\max}}{RMS} \quad (2.6)$$

Při hodnocení detekce poškození jsou rovněž využívány statistické parametry, které mohou citlivěji reagovat na vznikající poškození. Následující vztahy uvádějí nejčastěji užívané momenty. Vychází se z představy Gaussova normálního rozdělení. Statistický moment třetího řádu je označený jako koeficient šikmosti *Skewness* (2.7). V případě symetrického rozdělení je jeho hodnota nulová. Druhým z častých parametrů statistického zpracování je koeficient špičatosti *Kurtosis* (2.8). Tento parametr poskytuje informaci o poloze hodnot kolem středu rozdělení, přičemž oba momenty zahrnují ve výpočtu směrodatnou odchylku (2.9).

$$S = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (2.7)$$

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (2.8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (2.9)$$

2.3.2 Vyhodnocování signálu ve frekvenční oblasti

2.3.2

Existují tři základní způsoby hodnocení spojitě AE. První způsob je hrubý odhad, který poskytuje pouze informaci o počtu překmitů přes nulovou hodnotu za čas ΔT . Skutečné frekvenční charakteristiky je možné získat až rozkladem signálu na frekvenční složky (toto mohou být například oblasti kolem 50 kHz, 150 kHz, 250 kHz, ...). Druhou možností je využít parametr RMS v několika frekvenčních pásmech (využití pásmech jako filtru [9]) a tyto pásma přepínat. Poslední metoda a zatím nejvýhodnější na vyhodnocování signálu ve frekvenční oblasti je použít FFT (Fast Fourier Transformation) na plně digitalizovaný signál [1].

Shannon/Kotělnikova vzorkovací věta zjednodušeně praví, že aby byl signál jednoznačně rekonstruován, musí obsahovat frekvenční složky pouze menší než $f_{\max}$ (Nyquistova frekvence - minimální vzorkovací frekvence), (2.10). Avšak, tato podmínka je pouze teoretická, v praktických podmínkách se používá nejméně čtyřnásobek maximální frekvence, nebo násobek ještě vyšší. Pokud podmínka není splněna, hrozí tzv. *aliasing* a výsledný rekonstruovaný signál se potom od původního může výrazně lišit. Problém pak může nastat i při vyhodnocování frekvenčních spekter, kde mohou při nedostatečné f_{vz} vzniknout tzv. fiktivní spektrální složky [10].

$$f_{vz} > 2 f_{\max} \quad (2.10)$$

Fourierova Transformace

Fourierova transformace slouží jako nástroj pro rozložení složek signálu do frekvenční oblasti, ve které je následně teoreticky možné rozlišit jednotlivé původce událostí AE, praktické realizace jsou mnohdy velice komplikované a odhalit jednotlivé skryté složky signálu je velice obtížné. Kromě Fourierovy transformace (FT) se používají ještě další, jako je vlnková (*wavelet*), *kosinova* nebo *Walsh-Hadamardova* transformace. Základní definice FT a její zpětná transformace pro spojitý signál jsou definovány ve výrazu (2.11) a (2.12), kde f je frekvence a j je imaginární složka, parametr $2\pi f$ je často nahrazován úhlovou frekvencí ω [10].

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.11)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2.12)$$

Výsledek této základní Fourierovy transformace pro spojitý signál bývá komplexní výraz (2.13), kde $\varphi(f)$ je fázové spektrum a $|F(f)|$ je amplitudové spektrum (amplitudová spektrální hustota).

$$F(f) = \text{Re}(f) + j \text{Im}(f) = |F(f)| e^{j\varphi(f)} \quad (2.13)$$

Dalším typem transformace signálu do frekvenční oblasti je použití Fourierovy transformace diskretních signálů, která je označena jako *DTFT* (Discrete Time Fourier Transform) a její vyjádření v přímém a zpětném tvaru je ve výrazu (2.14), respektive (2.15).

$$F(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j2\pi fn} \quad (2.14)$$

$$x(n) = \sum_{-f_{vz}/2}^{f_{vz}/2} F(f) e^{j2\pi fn} df \quad (2.15)$$

Posledním typem transformace diskretních signálů je *DFT* (Discrete Fourier Transform), která je definována vztahy (2.16) a (2.17) a jako jediná je vhodná pro praktickou realizaci. Tato transformace pracuje s konečnými posloupnostmi v časové i frekvenční oblasti, kde N počtu hodnot z jedné oblasti odpovídá N počtu hodnot z druhé oblasti. Jednotlivé hodnoty jsou od sebe vzdáleny o Δf (2.18), kde N je počet vzorků a T je časový interval mezi vzorky (NT - celková doba signálu) [10]. Pro výpočet *FT* se v praktických aplikacích využívá *FFT* (Fast Fourier Transform), která vychází z *DFT*, ale doba a tedy i náročnost výpočtu algoritmu je podstatně zkrácena.

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.16)$$

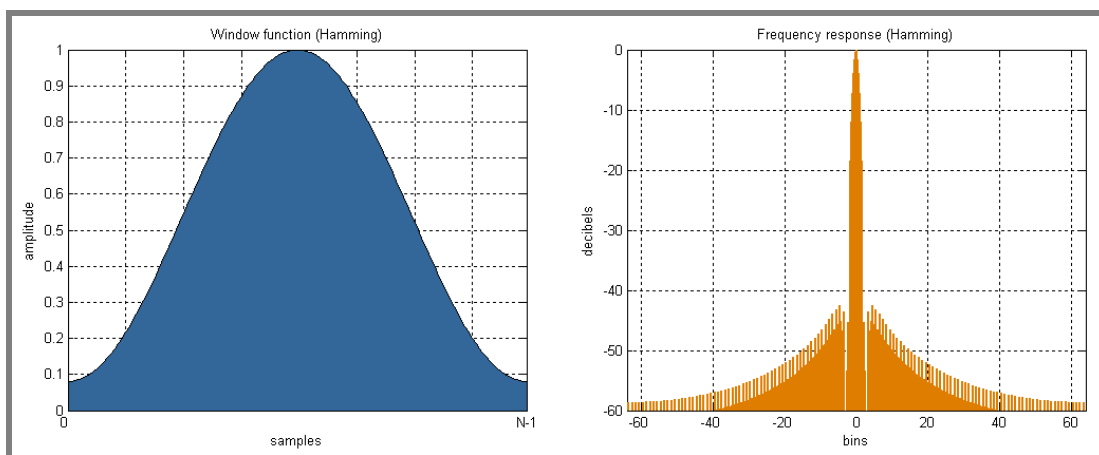
$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.17)$$

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} = \frac{1}{NT} \quad (2.18)$$

Problémů při zpracování signálu může nastat celá řada, nicméně jedním z prvotních rušivých elementů vnesených do zpracování signálu je tzv. *leakage* – což je jakési prosakování energie do sousedních frekvenčních bitů. To je způsobeno nezahrnutím celého počtu period signálu do vybraného úseku a ke vzniku nespojitostí, tímto jevem dojde k deformaci spektrální čáry (snížení amplitudy, deformování na dvě, nebo více menších čar). Proto, aby vyhodnocený signál odrážel co nejvěrněji

idealizovaný tvar, zavádí se do řetězce zpracování ještě před *DFT* násobením vhodnou funkcí, která potlačí účinky začátku a konce signálu [10]. Funkcí pro úpravu signálu může být použita celá řada, podrobněji se tímto zabýval Harris (1978) [11] (obdélníkové okno, trojúhelníkové, Hannovo, Blackmanovo, Hammingovo, Poissonovo, Cauchyho, Gaussovo a další). Asi nejčastěji užívaná funkce pro úpravu signálu je Hammingovo okno (2.19), kde n je $0 < n < N-1$ a N reprezentuje šířku vzorku, nejčastěji je to $10^2=1024$. Ukázka použití Hammingova okna je na obr. 2.4.

$$w(k) = 0,54 - 0,46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N-1}\right) \quad (2.19)$$



Obr. 2.4 Ukázka Hammingova okna a jeho frekvenční odezvy [12].

Dalším z parametrů, kterými lze popsat chování měřeného objektu, je výkonová spektrální hustota signálu PSD (Power Spectral Density), která charakterizuje rozložení výkonu v závislosti na frekvenci. Tato charakteristika je zatím asi nepoužívanější metodou hodnocení zastoupení významných frekvenčních složek signálu, kde výstupem je plocha pod křivkou (charakterizována jako výkon signálu). Literatura uvádí dva typy výkonové spektrální hustoty - jednostranná $G_{xx}(f)$ a dvoustranná výkonová spektrální hustota $S_{xx}(f)$, jejich formulace jsou uvedeny ve výrazech (2.20) a (2.21). K výpočtu $S_{xx}(f)$ je možné použít metody neparametrické (periodogram, nebo Welchova metoda), parametrické (odhad PSD autoregresní metody, Burgův algoritmus) a metody využívající k odhadu PSD vlastní čísla korelační matice. Pro výpočet PSD z výrazů 2.20 a 2.21 se využívá autokorelační funkce $R_{xx}(\tau)$. Jednotkou PSD je ($\text{W}\cdot\text{Hz}^{-1}$) nebo ($\text{V}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$) [10].

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & \text{pro } f \geq 0 \\ 0 & \text{pro } f < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.21)$$

Další možnosti hodnocení signálu ve frekvenční oblasti

Analýza signálu s uvedenými postupy (časová oblast - Counts, Events, RMS, frekvenční oblast – DFT, FFT, Hamming, PSD) se přímo týká této dizertační práce, ale avšak za zmínku stojí i další významné metody hodnocení signálu zejména ve frekvenční oblasti.

Kepstrální analýza je frekvenční operace, která má zpřehlednit frekvenční spektrum odstraněním některých skupin harmonických složek a zvýšit tak přehlednost (v signálu se může vyskytovat více základních frekvencí a jejich harmonických složek). Postup této frekvenční filtrace je takový, že se na PSD aplikuje přímá transformace do kepstrální oblasti, zde se hřebenovým filtrem odstraní vybrané složky a provede se zpětná transformace do spektrální oblasti, což je označováno za tzv. *liftering*.

Hilbertova analýza se využívá pro demodulaci amplitudově modulovaného signálu, jedná se o transformaci z časové oblasti opět do časové s posunutím fáze o $\pi/2$. Obálka signálu se tvoří z absolutní hodnoty tzv. analytického signálu (2.22), kde $x(t)$ je původní signál a $\tilde{x}(t)$ je Hilbertův obraz. Výsledná rovnice obálky je uvedena ve výrazu 2.23 a pro lepší rozlišení se využívá logaritmické stupnice.

$$x_a(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) \quad (2.22)$$

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (2.23)$$

Vlnková (*wavelet*) transformace je používána pro další zvýšení čitelnosti záznamu, kde do řetězce zpracování vstupuje mateřská vlnka. Tato vlnka mění rozlišení v čase i ve frekvenci (u nižších frekvencí je zobrazované pásmo širší a pro vyšší frekvence je užší).

2.3.3

2.3.3 Zhodnocení analýzy signálu AE

Analýza signálu využitím metody AE je poměrně rozsáhlá vědní disciplína zahrnující nezbytné znalosti o charakteru signálu, způsobu jeho detekce a neméně důležitým způsobu vyhodnocení. Obvyklý frekvenční rozsah metody AE se pohybuje zhruba od 100 kHz do 4 MHz, přičemž je rovněž závislý na použité aparatuře. V této frekvenční oblasti by měl být detekovatelný růst trhliny, zejména v sekundární části, kde dochází ke vzájemnému tření stěn trhliny. Signál AE se z místa aktivní poruchy šíří ve formě kulových vln, na povrchu se tyto kulové vlny transformují do vln podélných, příčných a obecně do vln povrchových (Rayleigh vlny). Ve speciálních případech, jako je tomu například u velkých tenkých ploch nastávají deskové vlny (Lamb vlny), nebo v případě prutových tvarů (čarová vlna), u nichž je příčný průřez mnohonásobně menší, než jejich délka. Při cestě napět'ových vln od vyzařovaného zdroje k místu snímání (povrchu) může být napět'ový signál ovlivněn mnoha faktory (vliv materiálu, vměstky, bubliny, povrchové svary a další). Tím signál postupně ztrácí intenzitu, až může dojít k jeho částečnému, nebo celkovému utlumení. I přes přítomnost diskontinuit se vlny v materiálu (stejněho složení) šíří relativně stejně rychle. Toho je využíváno zejména k lokalizaci defektu použitím více snímačů AE.

V oblasti přístrojového vybavení jsou dnešní možnosti stále posouvány kupředu, dochází k získávání podrobnějších informací v četnosti, ale i popisu signálu. Samotné snímače už tak rychlý vývoj nenesou a stále se využívá piezokeramiky, nebo

polykrystalických polymerů. Pro relativně úzké pásmo snímání (například 100 kHz – 400 kHz) je možné využít snímačů s rezonanční frekvencí mimo toto pásmo a zaručit tak stabilnější citlivost. Při experimentálním zkoušení ložisek je prozatím využíváno celého možného rozsahu snímání, tedy včetně změn vyvolaných rezonančními frekvencemi.

Vyhodnocovat signál lze ve dvou oblastech, časové a frekvenční. Způsob vyhodnocení v časové oblasti je poměrně kvalitně zpracovaný. Díky vysokofrekvenčnímu vzorkování je možné vyčíst maximální amplitudy, rozčlenit sílu signálu do různých hladin intenzity, nebo sledovat tvar jednotlivých hitů. Analýza signálu ve frekvenční oblasti je stále prohlubována, jsou aplikovány nové metody filtrace, modulace a způsobu prezentování výsledků.

2.3.4

2.3.4 Aplikace AE v monitorování ložisek

V dnešním 21. století je monitorování základních uzlů rotačních strojních soustav téměř nepostradatelné. Jsou kladeny stále vyšší požadavky na stanovení alespoň přibližné prognózy zbytkové životnosti konstrukcí, strojů a klíčových strojních uzlů, která 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, nosníky, dále také ve výzkumu – například: zkoumání růstu trhlin u destrukčních zkoušek nejrůznějších materiálů, a jiné).

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 [13].

Akustická emise vzniká jako odezva na dynamické procesy emitované ve vysokofrekvenční oblasti. Symptomy poškození jsou často skryty mezi ostatní odezvy 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 [14].

2.3.5

2.3.5 Porovnávání citlivosti detekce metod na přítomnost defektu

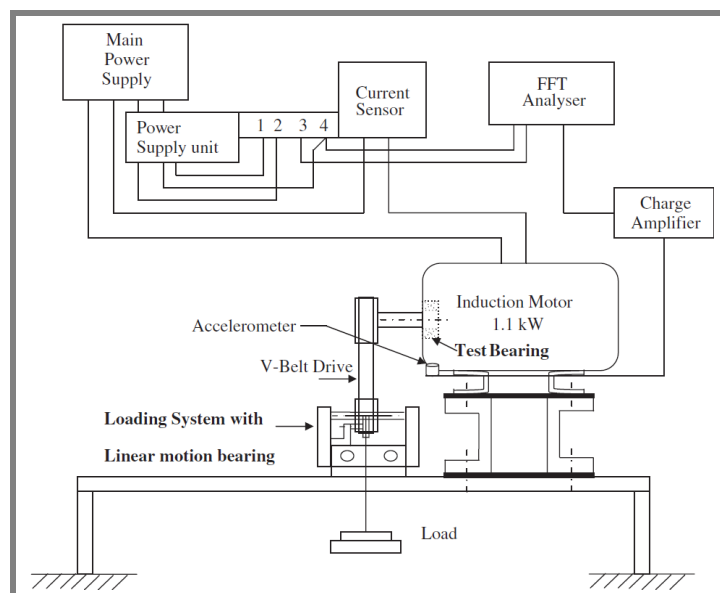
V současné době se monitorování a zkoumání různých stavů zatěžování ložisek a ložiskových materiálů věnuje celá řada autorů a vědců. N. Tandon a kol. (2005) se ve svém článku [16] věnovali srovnání několika diagnostických metod při monitorování stavu valivého ložiska indukčního motoru. Autoři zde uvádějí 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 radiálního ložiska. Experiment byl proveden s různými stupni zatížení pro všechny použité monitorovací techniky a záznamy byly posléze porovnány.

Obrázek 2.5 zobrazuje použitou měřicí aparaturu. Mezi nejdůležitější položky patří jednofázový indukční motor s výkonem 1,1 kW a otáčkami 1440 min^{-1} . 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.

Měření probíhala od nulové zátěže až do plného zatížení (27 kg) po přídatku 5 kg a s posledním přidáním 2 kg. Otáčky motoru byly konstantní 1440 min^{-1} a pro porovnávací zkoušky byla použita 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 $1500 \mu\text{m}$, s krokem $250 \mu\text{m}$ postupně po každém měření a konstantní hloubkou $2500 \mu\text{m}$.

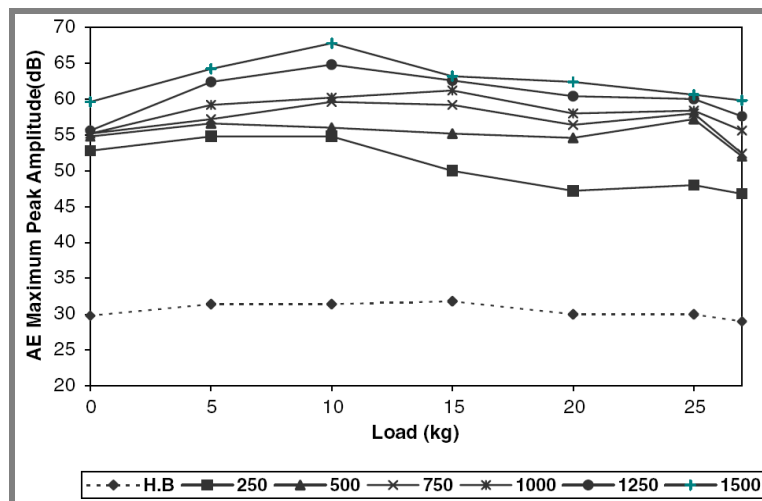
Monitorování akustickou emisí probíhalo současně s ostatními technikami měření od nulové zátěže až do plného zatížení. Obrázek 2.6 popisuje průběh špičkových amplitud AE pro definované velikosti defektu v závislosti na zvyšování zatížení. Rozdíl zdravého ložiska a ložiska s maximálním defektem je velice 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.



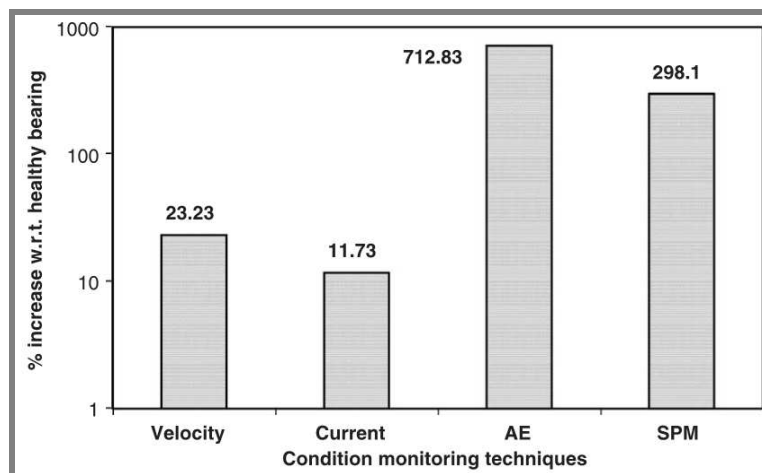
Obr. 2.5 Schematický diagram testovací výbavy [16].

Porovnání různých technik monitorování poškození použitých při experimentu pro různé stupně poškození a zatížení ukazuje obr. 2.7 a obr. 2.8, kde je procentuální zvýšení odezvy poškozeného ložiska s respektováním průměrné hodnoty zdravého ložiska. Jak ukazují tyto grafy, nejvyšší podíl je vždy u metody AE následované

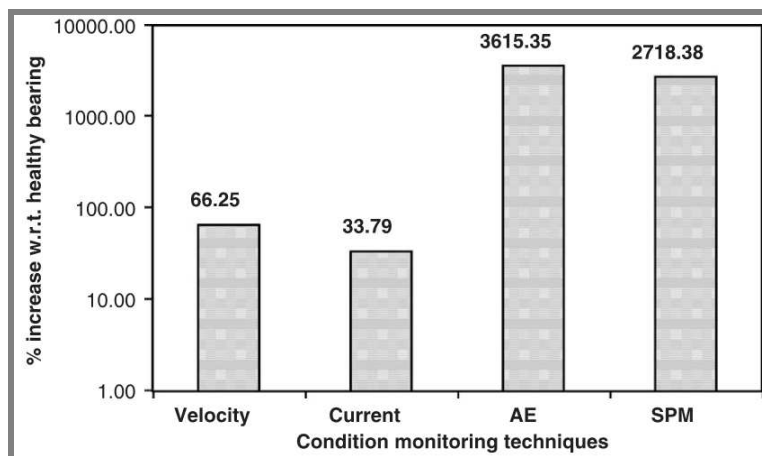
metodou SPM, měření rychlosti vibrací a satorovými proudy je na místě třetím, respektive čtvrtém. Ačkoliv metoda měření satorovými proudy vyšla až jako nejméně efektivní, má tato metoda minimální požadavky na vybavení a někdy je též označována jako bez-senzorová metoda.



Obr. 2.6 Špičky amplitud akustické emise s defektem dráhy vnějšího kroužku [16].



Obr. 2.7 Porovnání monitorovacích technik pro minimální velikost defektu [16].



Obr. 2.8 Porovnání monitorovacích technik pro maximální velikost defektu [16].

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.

Analýza statorových proudů

Problematikou monitorování statorových proudů, jako nástroje pro diagnostiku ložiskových poruch, se podrobně zabýval ve své dizertační práci Zhou Wei (2007) [15], který tuto metodu rovněž srovnával s metodou měření vibrací. Nejefektivnější metoda použitá při experimentu [16] 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 odezvy na poškození až devítinásobné (2718 / 298).

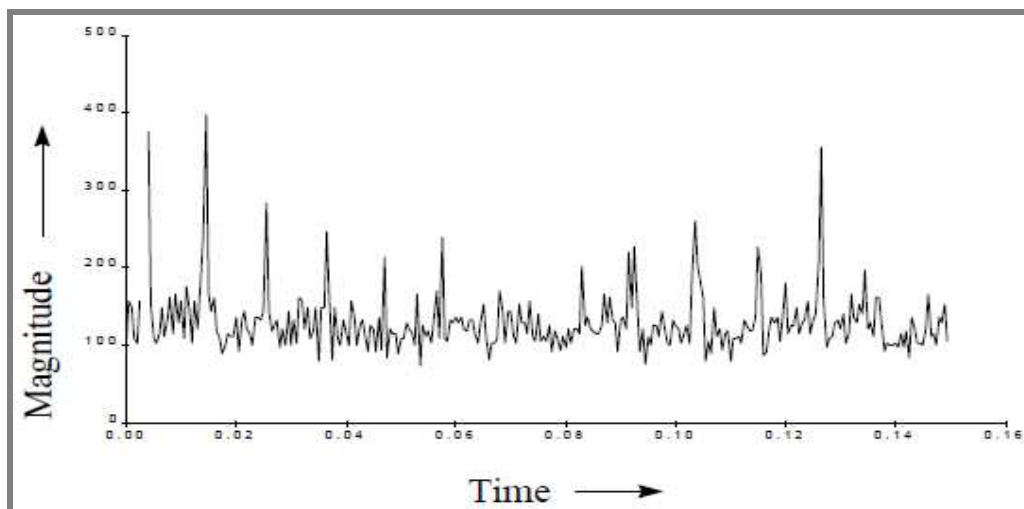
Měření harmonických statorových proudů probíhalo za stejných podmínek jako ostatní měření. Největší amplitudový skok harmonického statorového proudu nastal už při prvním poškození 250 μm , dalším zvětšováním defektu byly relativní změny poměrně nízké a k dalšímu razantnějšímu nárůstu (až o 39,97 %) došlo 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 statorem 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 zatížení stroje a zvýšené opotřebení ložiska [16].

Metoda AE v časové oblasti

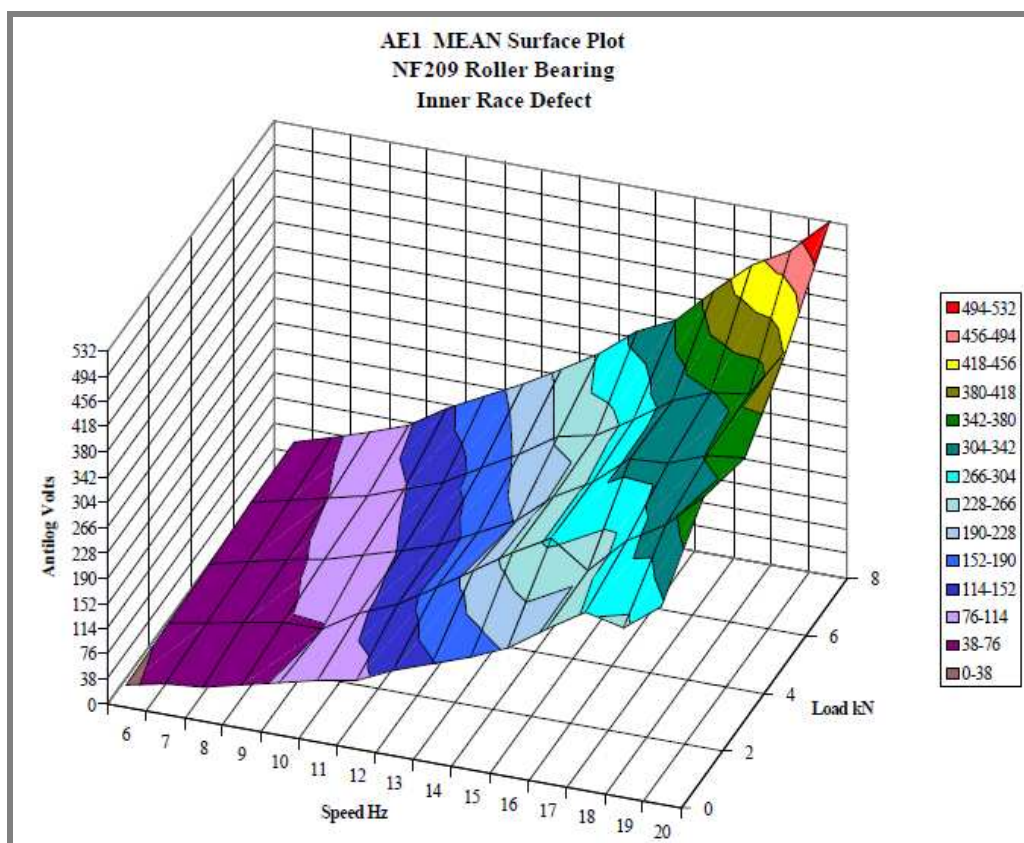
Jedním z dalších významných autorů, který se zabývá monitorováním strojních uzlů, potažmo i ložisek je T. J. Holroyd. Ve svém článku [17] uvádí parametr *Distress®* jako kvalitní nástroj pro detekci poškození v časové oblasti snímání signálu AE. Holroyd poukazuje na možnost detekce poškození využitím obálky časového záznamu, ve kterém pak mohou vyvstat špičky způsobené defektem na některé z valivých částí ložiska. Tento poznatek dokládá grafem na obr. 2.9, kde je zachycen signál AE v délce 0,16 s. V signálu jsou objeveny pravidelné špičky, které mají periodu 11 ms a odpovídají tedy vypočtené frekvenci poškození vnitřního kroužku ložiska (91 Hz).

Další možnou prezentaci výsledků AE ve formě celkového pohledu na signál, či střední hladinu signálu zobrazuje obr. 2.10, získaná data jsou naměřena s defektem na vnitřním kroužku valivého ložiska. Defekt způsobuje špičkové hodnoty v ploše grafu. Z porovnání grafů na obr. 2.9 a obr. 2.10 je možné konstatovat, že střední hodnota odráží menší amplitudy signálu při rázových pulsech, avšak je velmi citlivá na průběžné (trvalé) zdroje, jako je například opotřebení 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 měřenými za podobných podmínek. Přístup FFT je pro pouhou otázku

poškození značně komplikován, pro tento účel je vhodnější využít časové oblasti zpracování signálu.



Obr. 2.9 Záznam napět'ových pulsů z defektu dráhy vnitřního kroužku ložiska [17].



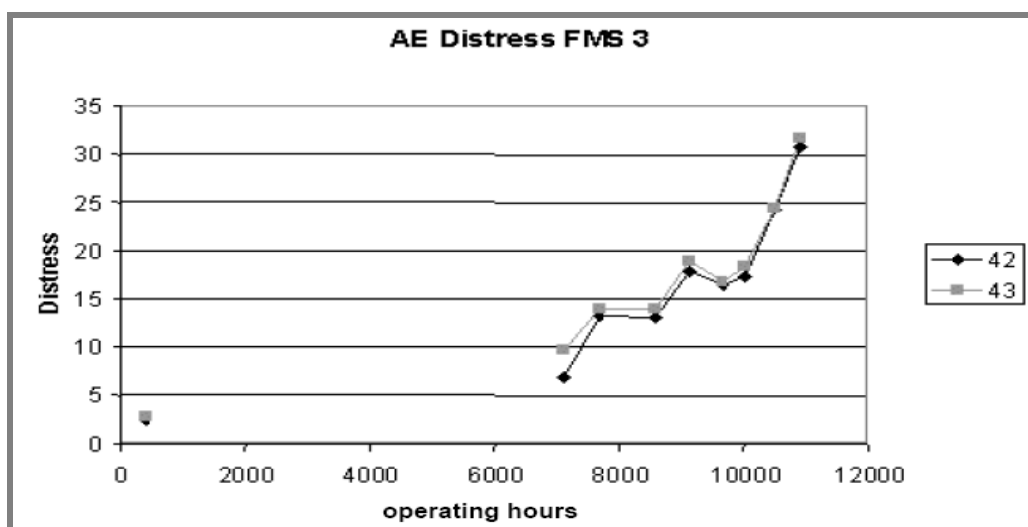
Obr. 2.10 Závislost velikosti zatížení a rychlosti otáčení na střední hodnotě signálu AE [17].

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 žádoucí i monitorování

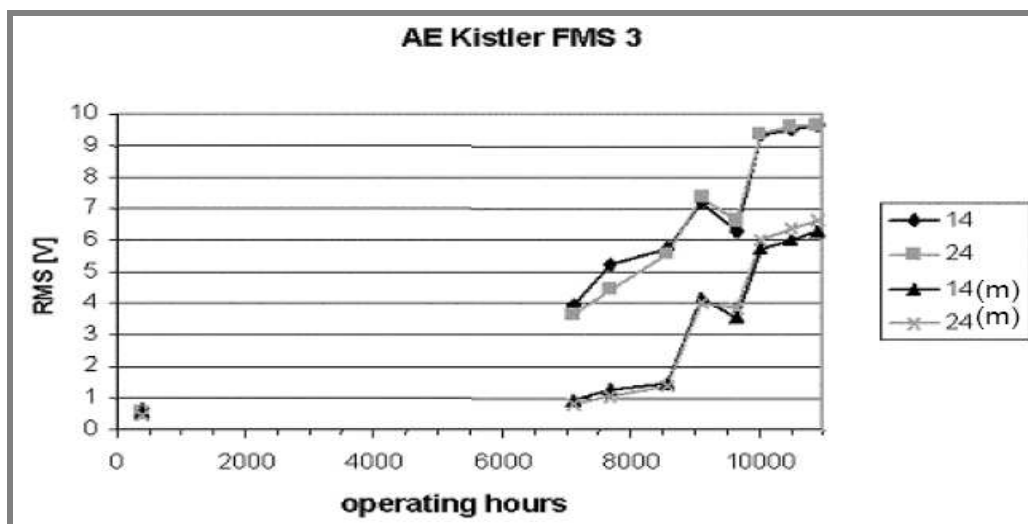
vibrací a to například, pokud zdroj poruchy generuje nízkofrekvenční vlnění (například při nevyvážení rotačních součástí).

Porovnání metod měření vibrací a AE přímo v provozních podmínkách uskutečnil M. Ruuska a P. H. Andersson. V článku [22] popisují 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.

Během zkoušení byla AE zaznamenávána parametrem *Distress®* pro dva rozdílné převody (42 = 1. převod, 43 = 2. převod) s velikostí otáček 500 min^{-1} , viz obr. 2.11. Druhý parametr v oblasti monitorování AE byla střední kvadratická hodnota signálu – *RMS*, která je zobrazena na obr. 2.12, pro různé provozní podmínky s otáčkami 2000 min^{-1} (14 = bez vyvažovacích nástrojů, 24 = s vyvažováním, m = střední hodnota).

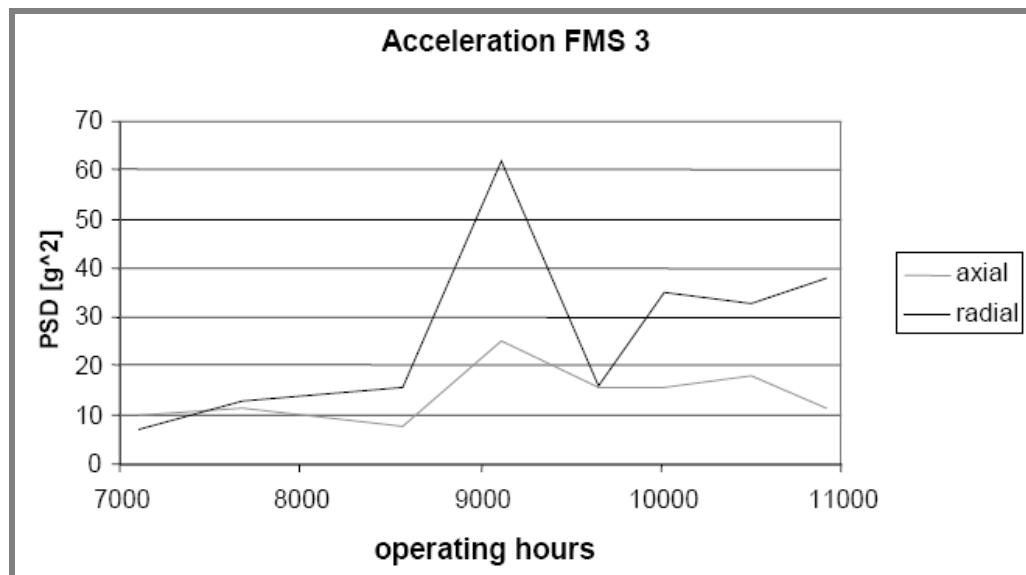


Obr. 2.11 Záznam AE Distress® pro dva převody při 500 min^{-1} [22].



Obr. 2.12 Záznam AE RMS pro vyvážené a nevyvážené podmínky [22].

Záznam z měření vibračního zrychlení je na obr. 2.13, jak z axiálního, tak i 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. 2.13 Záznam vibračního zrychlení v axiálním i radiálním směru měření [22].

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 dovoluje použití i u jiných typů obráběcích strojů a strojních uzlů, jako jsou například pohybové šrouby. Kromě standardního parametru AE RMS je zde parametr *Distress®*, který vykazuje vyšší citlivost na vznikající poškození včetně. Měření vibračního zrychlení prokázalo i zde svoji vhodnost, jako nástroje pro identifikaci orientačního průběhu rozvoje kontaktního poškození.

Vibrace

Využitím metody monitorování vibrací se i v dnešní době zabývá celá řada diagnostických firem, používaná aparatura je stále zdokonalována a k ní i softwarové vybavení. Aplikací metody měření vibračního signálu se zabývá například S. Orhan a kol. (2006) [18]. Při analýze vibračního signálu se vychází zejména ze známé otáčkové frekvence, vůči které se vztahují projevy poškození jednotlivých konstrukčních uzlů. 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 výrazů (2.24) až (2.27).

S. Orhan se ve článku [18] zabývá případovými studiemi posuzování stavu ložisek měřením hladiny vibrací a ukázka z výsledků jedné ze studií je v grafu na obr. 2.14, kde jsou zobrazeny frekvenční špičky nasnímaného signálu. Experimentální výsledky byly srovnány s vypočtenými hodnotami a bylo usouzeno na poškození dráhy vnitřního kroužku (98,48 Hz), viz tab. 2.1. Graf na obr. 2.14 zobrazuje základní frekvenci poškození vnějšího kroužku a její harmonické složky.

$$FTF = \frac{n}{2} \left[1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right] \quad (2.24)$$

$$BSF = \frac{n}{2} \left(\frac{d}{D} \right) \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2(\alpha) \right] \quad (2.25)$$

$$BPFO = \frac{n}{2} N_b \left[1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right] \quad (2.26)$$

$$BPFI = \frac{n}{2} N_b \left[1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right] \quad (2.27)$$

kde: n [Hz] - rychlost otáčení hřídele
 N_b [-] - počet valivých elementů
 α [°] - kontaktní úhel
 d [mm] - průměr valivých elementů
 D [mm] - roztečný průměr valivých elementů v ložisku

FTF (Fundamental Train Frequency) - závada klece

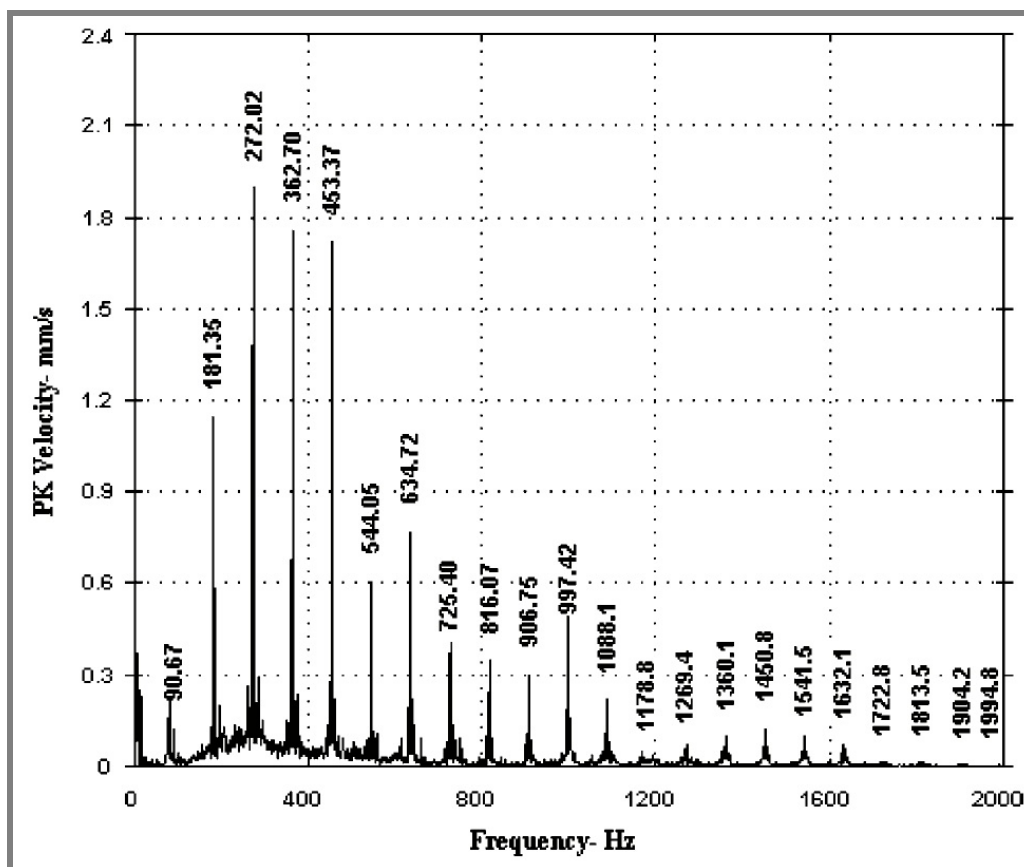
BSF (Ball Spin Frequency) - závada valivého elementu

BPFO (Ball Pass Frequency - Outer Race) - závada vnějšího kroužku

BPFI (Ball Pass Frequency - Inner Race) - závada vnitřního kroužku

Tab. 2.1 Vypočtené frekvence poškození testovaných ložisek [18].

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. 2.14 Frekvenční spektrum se špičkou 90,67 Hz a jejími násobky [18].

Statistické momenty

Při analýze signálu jsou pro klasifikaci poruchy používány rovněž momenty jako šikmost (skewness), špičatost (kurtosis) a *Crest* faktor. Podrobně se těmto momentům věnovali R. B. W. Heng a M. J. M. Nor (1997) [19], detailnímu rozboru parametru špičatosti aplikovaného na diagnostiku radiálních ložisek se zabýval rovněž H. R. Martin a F. Honarvar (1995) [20]. Souhrnně zpracovanou práci zaměřenou na analýzu použití statistických parametrů pro hodnocení poškození ložisek v časové oblasti vytvořil J. Vass [21]. Z uveřejněných publikací vyplývá závěr, že ačkoliv jsou tyto charakteristiky signálu přínosné pro určení stavu sledovaného objektu, v dnešní době se stále více využívají jen jako doplňkové a přechází se zejména na podrobné zpracování signálu ve frekvenční oblasti.

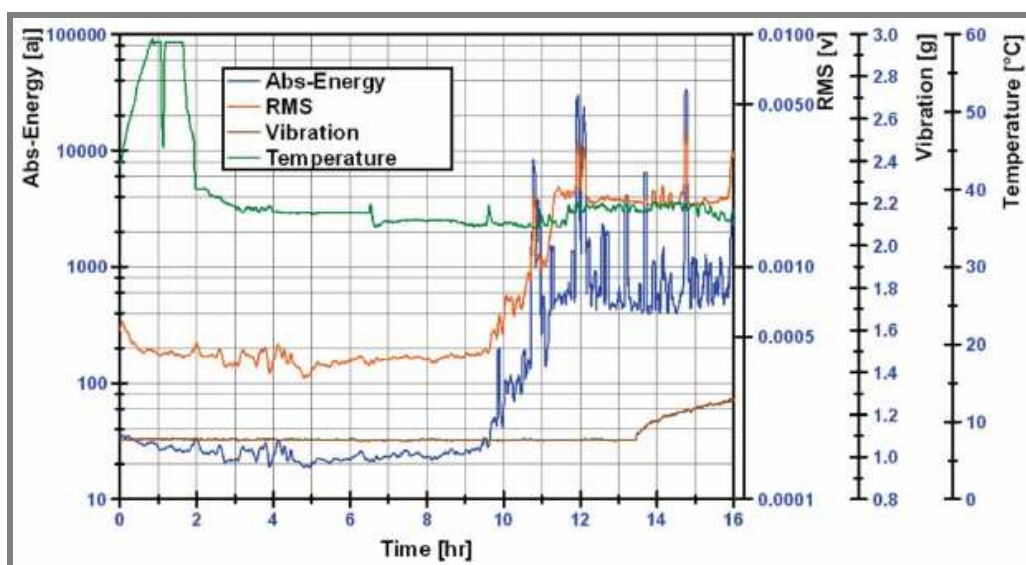
Teplota

Měření teploty je jednou z nejčastěji používaných komparačních metod hodnocení poškození strojního uzlu, ať už při experimentálních zkouškách, nebo přímo v provozních podmínkách. V dnešní době se asi nejvíce využívá termočlánků umístěných přímo nebo v těsné blízkosti zkoušeného vzorku. V případech, kdy se jedná spíše o doplňkovou informaci s nepravidelnou periodou, se uplatňují laserové a dotykové pyrometry.

Zvýšená teplota ložiska nastává nejčastěji z důvodu přítomnosti zvýšeného tření kontaktních ploch. Příčinou nárůstu tření může být zvýšení zatížení kontaktní plochy a s tím spojené porušení mazacího filmu, úbytek maziva, či samotnou jeho degradaci.

Degradace maziva úzce souvisí s provozní teplotou a je tedy nutné dodržet teplotní podmínky, na které bylo ložisko a jeho náplň (olejová, plastické mazivo) navrženy.

Ukázka záznamu signálu AE, vibrací a teploty je znázorněna v grafu na obr. 2.15. Zkouška probíhala celkem 16 hodin, po kterých bylo objeveno viditelné poškození dráhy. Z průběhu grafu je patrný pozvolný nárůst parametrů *RMS* a *Abs-Energy* (energie signálu v jednotkách 10^{-18} J) asi od deváté hodiny zkoušky, zatímco vibrace poukázaly na zhoršení povrchu až v 13,5. hod. 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 procesům spojeným se vznikem a rozšiřováním výrazných poškození na povrchu testovaného kroužku.



Obr. 2.15 Graf průběhu studie I se všemi sledovanými parametry v závislosti na čase [31].

Nový a originální přístup měření teploty ložiska uvedl ve svých člancích [23], [24] J. A. Henao-Sepulveda a kol. (2005, 2006), kde uveřejnili práci zaměřenou na bezdrátové snímání teploty ložiska přímo z ložiskové klece. Experiment byl složen z kuličkového ložiska, dvou teplotně citlivých kapacitorů a tzv. *Coplitts* oscilátoru. Dále je zde využito antény na výstupu z oscilátoru a přijímač napojený na počítač pro další zpracování signálu. Napájení k sensorům i přenos dat je řešen bezdrátově a bez baterií.

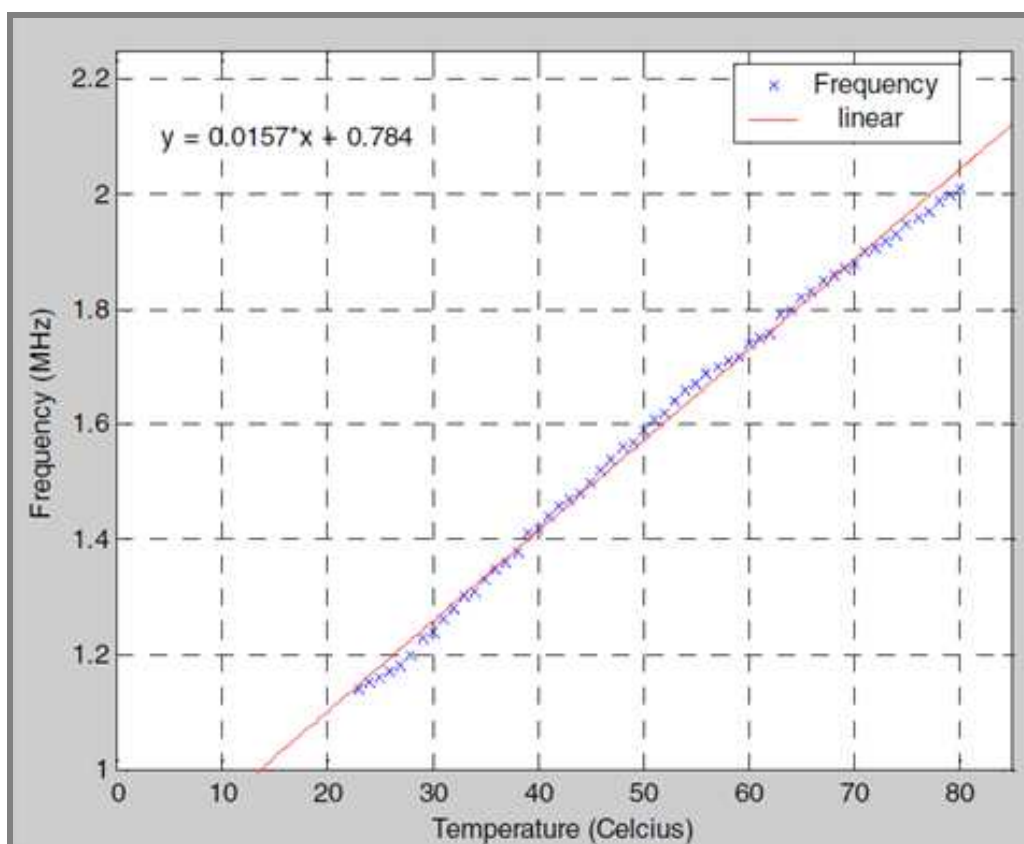
Ukázka teplotního senzoru instalovaného na ložisko je na obr. 2.16. Tento zapojený okruh byl vyroben firmou Dupont, zabývající se vývojem tenkých mazacích filmů. Před experimentální zkouškou byla provedena kalibrace teplotního senzoru ponořením ložiska do olejové lázně a následným zahříváním. Záznam kalibrace je na obr. 2.17, záznam obsahuje průběh závislosti frekvence na teplotě, přičemž bylo zjištěno, že frekvence 1,16 MHz odpovídá 25 °C.

Experimentální zkouška probíhala za použití klasického horizontálního soustruhu, kde do vřetene bylo upnuto ložisko za vnější kroužek. Do vnitřního kroužku byla zasunuta hřídel a přes ni působilo stanovené zatížení (11,25 kg, nebo 20,25 kg), provozní otáčky byly stanoveny na 1550 min^{-1} . Záznam teploty obsahuje klidový stav, pozvolný nárůst, až postupně k lineárnímu průběhu a ochlazování po vypnutí, viz. obr. 2.18.

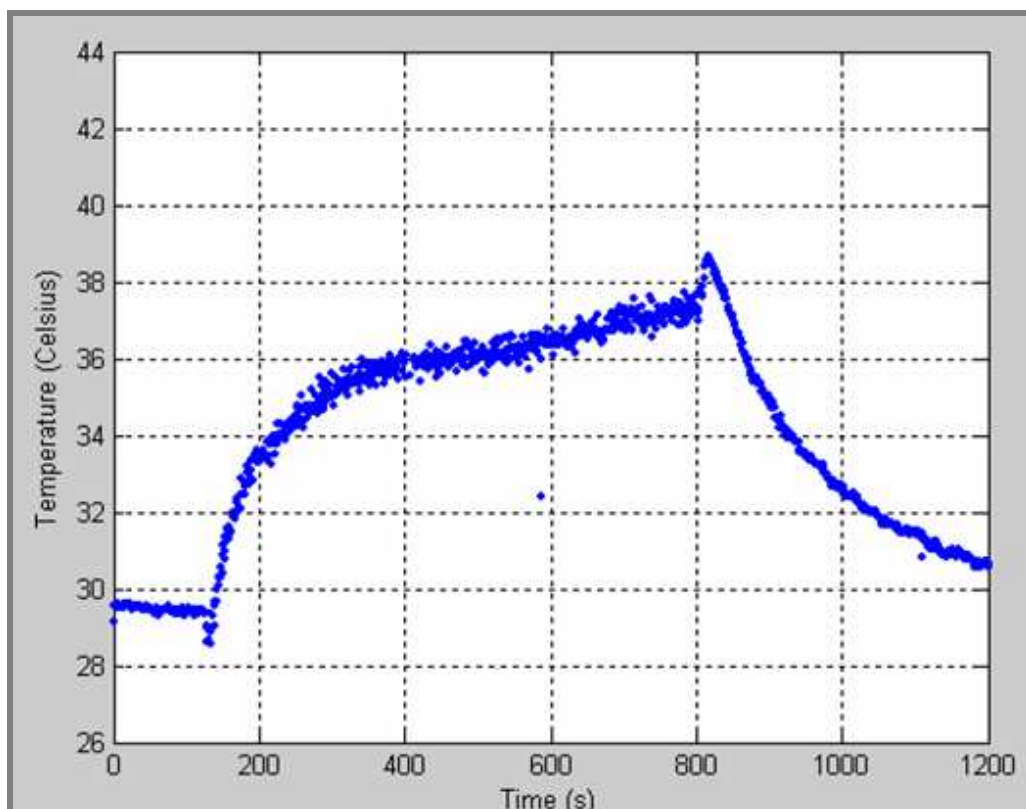
Aplikace bezdrátové technologie na monitorování teploty je možné použít nejen na ložiska (dostatečně velká), ale i na jiné konstrukční uzly, obecně rotující, nebo vibrující součásti, ale i jiné, kde je problémem přímé propojení.



Obr. 2.16 Bezdrátový senzor teploty instalovaný na kuličkovém ložisku [23].



Obr. 2.17 Kalibrační výsledky teplotního snímače [23].



Obr. 2.18 Záznam teploty během experimentální zkoušky ložiska upnutého v soustruhu. [23].

Ultrazvuk a vibrace

Yong-Han Kim a kol. se ve své práci [25] věnují porovnání dvou metod hodnocení a detekce poškození radiálního ložiska tradiční metodou měření vibrací a pomocí ultrazvuku. Při experimentu bylo použito válečkové ložisko s označením NJ2204, u kterého je možné vnitřní kroužek vysunout z klece. Na tomto vnitřním kroužku bylo vytvořeno poškození vrypem o šířce 1mm a průměrné hloubce 20 μm . Autoři také poznamenávají, že detekce poškození vnitřního kroužku je více problematická vzhledem k přítomnosti relativního pohybu vnitřního kroužku a valivých elementů. Výpočet frekvence poškození vnitřního kroužku stanovil hodnotu (BPFI) na 6,713 krát otáčky hřídele. Experimentální data byla nabírána v rozmezí otáček od 30 min^{-1} do 1200 min^{-1} a některé z výsledků porovnání analýzy vibrací a ultrazvuku v časové oblasti jsou uvedeny v grafech na obr. 2.19.

Yong-Han Kim využil poznatků z práce [27] Shiroishi, který poukázal na důležitý parametr Peak Ratio (PR) pro hodnocení detekce počátků poškození (2.28), kde P_j je amplituda frekvence defektu, S_k je amplituda frekvence mimo defekt, N je počet bodů ve spektru a n je počet harmonických ve spektru. Výsledky jsou prezentovány v modifikovaném parametru PR , který vykazuje vyšší citlivost na poškození, viz vztahy (2.29) a (2.30).

$$PR = \frac{N \sum_{j=1}^n P_j}{\sum_{k=1}^N S_k} \quad (2.28)$$

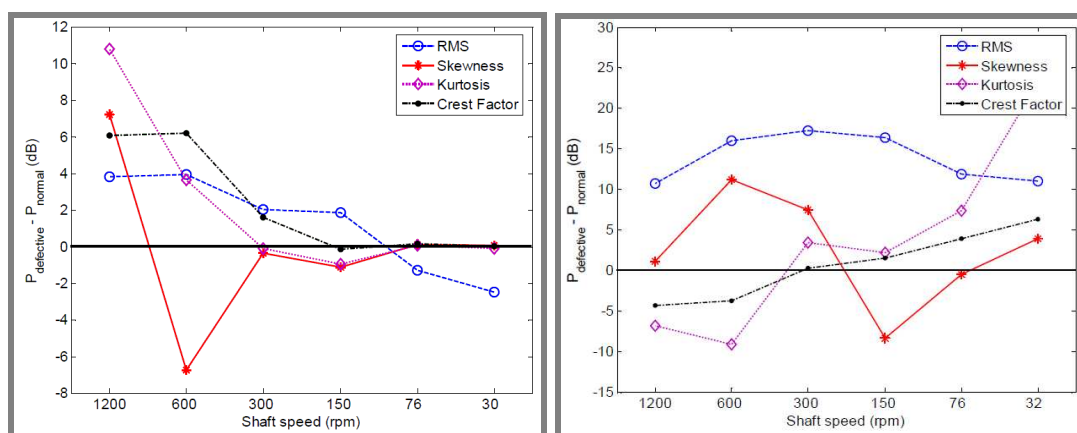
$$mPR_O = 20 \log_{10} \frac{\sum_{j=1}^n (P_j - A_s)}{A_s} \quad (2.29)$$

$$A_s = \frac{\sum_{k=a}^b S_k}{(b-a)} \quad (2.30)$$

kde: PR - poměr špiček signálu
 mPR_O - modifikovaný parametr PR
 A_s - průměrná amplituda spektra v rozsahu od a do b

Výsledky porovnání parametru PR pro analýzu vibračního měření a ultrazvuku jsou zobrazeny v grafech na obr. 2.19. Záznam zobrazuje analýzu ve formě statistických parametrů (RMS, Skewness, Kurtosis a Crest Factor). Levý graf na obr. 2.19 zobrazuje porovnání nepoškozeného ložiska s poškozeným při monitorování vibrací a jak je z průběhu patrné, všechny parametry vykazovaly strmý pokles vzhledem ke snižujícím se otáčkám. Z porovnání tedy vyplývá různá citlivost jednotlivých parametrů na vstupní otáčky.

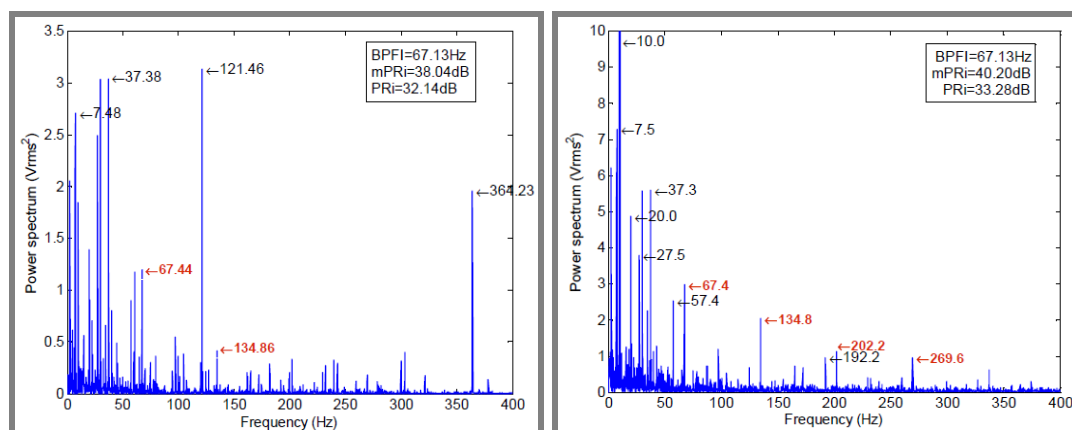
Při analýze signálu z ultrazvuku, viz. obr. 2.19 (vpravo), je jasně patrné, že citlivost je podstatně stabilnější v celém zkoumaném spektru vstupních otáček. Nejlepší závislost vykazuje parametr RMS , což jen potvrzuje jeho nadřazené používání v diagnostických aplikacích. Porovnání vibrací a ultrazvuku vykazuje stabilnější citlivost ultrazvuk zvláště v nižších otáčkách.



Obr. 2.19 Rozdíl parametrů PR u poškozeného a zdravého ložiska pro vibrace (vlevo), ultrazvuk (vpravo) [27].

Výsledky z experimentální zkoušky v podobě frekvenčních spekter jsou znázorněny na obr. 2.20, levý graf je analýza vibrací a pravý je ultrazvuk. Ve spektrech je obsažena obálka signálu pro poškozené ložisko se vstupními otáčkami 600 min^{-1} . Vypočtená frekvence poškození vnitřního kroužku ($67,13 \text{ Hz}$) a jejich harmonické složky se vyskytují v obou grafech. Při porovnání je patrná výraznější citlivost detekce na poškození vnitřního kroužku právě u ultrazvuku, v tomto ohledu je ve

spektu možné vyčíst větší počet harmonických složek a celková amplituda je oproti vibracím vyšší o 6 dB – 7 dB.



Obr. 2.20 Porovnání frekvenčních spekter u poškozeného a zdravého ložiska pro vibrace (vlevo), ultrazvuk (vpravo) [27].

Laser

Yimin Shao a Kikuo Nezu publikovali již v roce 1996 článek [28], ve kterém se věnují využití laseru jako nástroje pro detekci poškození ložisek. Jako výhodu zde označují neovlivnění sledovaného subjektu vlastní hmotností vibračních snímačů. Ovšem i zde je poukázáno na nemožnost přímé filtrace okolních vzruchů, které působí na sledované subjekty a po kterých se dále přenáší. Při experimentech byly sledovány odezvy na poškození vnějšího kroužku a valivého elementu. Z analýzy frekvenčního spektra nebyly frekvence poškozených částí zvláště výrazné, a proto autoři uvádějí statistické parametry, které citlivěji reagují na poškození. Mezi nejvýhodnější jsou uváděny parametry: *Crest factor*, *Impulse factor*, *Clearance factor* a spolu v kombinaci s analýzou frekvenčního spektra je možné posuzovat, zda je ložisko poškozeno. V současné době je laserové interferometrie využíváno zejména při kalibraci piezokeramických snímačů. Této problematice se nejvíce věnuje P. Theobald, který ve svých pracích rozpoznává detekce podélných a příčných vln. [29, 36].

2.3.6

2.3.6 Zhodnocení diagnostických metod

Diagnostické nástroje je obecně možné rozčlenit do kategorií, ve kterých jsou schopny reagovat na vnější podněty s citlivostí odpovídající mechanickému a elektrickému složení techniky (analyzátoru). Nejjednodušší přístup je poslechová metoda, kdy poškozená část stroje vyzařuje slyšitelný hluk/vzruch v námi slyšitelném frekvenčním pásmu 0 – 20 kHz. Využívání vibrační techniky je zhruba v rozmezí od 0 do 1 kHz pro měření rychlosti vibrací a v případě akcelerometrů až do 20 kHz. Za frekvenční rozsah ultrazvuku je považováno rozmezí od 20 kHz až do 50 MHz, přičemž ve speciálních případech mohou dosahovat i 200 MHz. Akustická emise se vyznačuje svojí použitelností od 100 kHz až do 4 MHz, přičemž je nutné podotknout, že počátek a konec detekce závisí zejména na technickém vybavení analyzátorů, a proto se metody mohou v určitých frekvenčních pásmech i výrazně překrývat.

Wei Zhou, Thomas G. Habetler a Ronald G. Harley publikovali článek, zabývající se shrnutím používaných nedestruktivních metod při hodnocení poškození ložisek [30]. Monitorování vibrací je obecně nejrozšířenější metodou hodnocení stavů

ložisek. Aplikace této metody vychází z možnosti využít periodičnosti rázů při průchodu valivých elementů přes utvářející se poškození. Tento přístup byl matematicky dobře zpracován a ověřen mnohaletou praxí [18]. U měření vibrací se stejně jako u dalších metod využívají k prezentaci výsledků také statistické parametry (RMS, Kurtosis, Crest faktor, Šikmost a další), které mají vynést vyšší citlivost do použité metody. Na některé problémy spojené s aplikací těchto parametrů upozornili autoři článku [25], zejména na nestálost parametrů při různých provozních otáčkách.

Jedním z dalších problémů spojených nejen s metodou měření vibrací je nutnost přístupu k měřenému objektu, případně i určité teplotní omezení v závislosti na typu použitého snímače a kabelového vedení. Některé konstrukce, nebo strojní zařízení jako ložiska jsou navrhovány s životností mnoha let, v tomto ohledu je nutné tzv. dlouhodobé monitorování a samotný vibrační snímač může být koncipován na kratší dobu, nebo může dojít k jeho poruše mnohem dříve [30]. Monitorování vibrací poskytuje informace o detekci poškození až při rozvinutém stádiu, kdy dochází k odlupování a vypadávání povrchových částí z drah ložisek. Až následným vlivem rázů při průchodu valivých elementů je možné detekovat vytvořené poškození a jeho další růst [26]. Yong-Han Kim a kol. [25] představují jako efektivnější metodu hodnocení detekce poškození využití ultrazvuku, přičemž zejména ve frekvenčním spektru je metoda citlivější na vyšší násobky harmonických složek.

Jedním z dalších způsobů, jak analyzovat vznikající poškození je použití chemické analýzy, při které dochází k rozboru plynné, kapalné, nebo pevné látky. Analýzou oleje můžeme dokazovat dva základní jevy poškození. V prvním případě se jedná o samotnou degradaci oleje, ta může vzniknout zejména zvýšením provozní teploty nad stanovený limit pro daný typ ložiska [23, 24]. Ve druhém případě to je kontaminace olejové lázně úlomky částeczek materiálu z valivých vrstev ložiskových drah a vzniku *pittingu/spallingu*. Analýzu oleje jako diagnostickou metodu lze použít pouze u olejových lázní převážně větších strojních soustav. U zakrytovaných ložisek s náplní plastického maziva je tato metoda prakticky nepoužitelná [30].

Monitorování teploty strojních uzlů, olejových náplní, ale i ložisek je ve většině případů nepostradatelnou součástí moderních diagnostických postupů. V dnešní době je trendem umisťovat teplotní čidla například přímo do vibračních snímačů. Při monitorování teploty ložiska je žádoucí, aby bylo teplotní čidlo umístěno co nejbližší ložisku nebo se ložiska dotýkalo. V ideálním případě je možné využít bezdrátové technologie a pokud to dispozice ložiska umožňují, je výhodné umístit čidlo přímo na klec ložiska [23]. Laserové pyrometry se využívají v případě nemožnosti uchycení čidla na snímaný povrch, nebo je-li nutné ochránit snímač před extrémními teplotami snímaného povrchu. Přijatelná mez teploty ložiska v provozních podmínkách závisí zejména na typu ložiska a pro jednotlivé provozy je upřesněna standardy (IEEE 841 předepisuje nepřekročení teploty ložiska nad 45 °C) [30].

Kromě analýzy zvuku a vibrací je často používaná metoda monitorování statorových proudů, která je hodnocena jako nejméně finančně nákladná a jednodušší oproti ostatním na aplikaci. V porovnání s ostatními metodami je méně citlivá na detekci (malého) defektu a poskytuje informace zejména o zařízení jako celku. Metoda monitorování statorových proudů je stále rozvíjena a její možnosti postupně posouvány.

Pro odhalení počátečních stádií kontaktní únavy (vznik únavové trhliny, odlupování materiálu z povrchu zatěžované součásti, vzniku *pittingu*) je aplikace metody AE ze současných metod nedestruktivního zkoušení na prvním místě.

Výzkum v oblasti kontaktní únavy aplikací metody AE je v dnešní době směřován na detekování poškození v co nejranějším stádiu a jeho lokalizaci. Metoda AE vykazuje vyšší citlivost signálu poškození k šumu (*signal-to-noise ratio*) oproti jiným metodám, avšak vyžaduje jak specializované pracovníky, tak i specifickou a nákladnou aparaturu. Analýza signálu je prováděna jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti. Většího rozvoje dosahují právě frekvenční spektra, modulace a filtrování signálu s novými postupy *Wavelet* sítě, nebo *Fuzzy-neuronové* sítě.

2.4

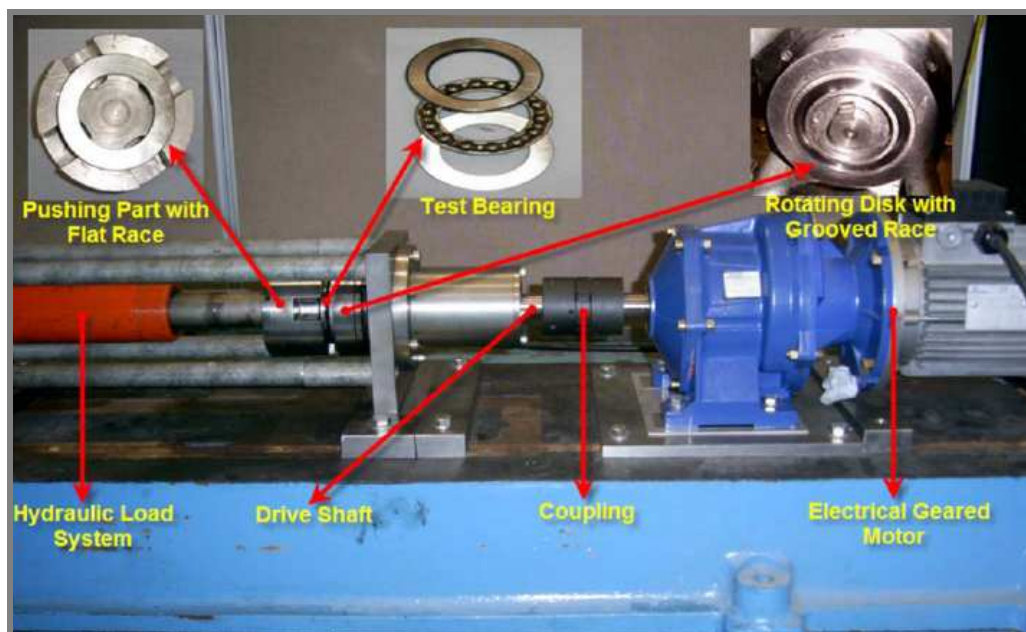
2.4 Detekce a lokalizace poškození

2.4.1

2.4.1 Detekce poškození axiálních ložisek

Detekci a lokalizaci poškození zejména valivých částí strojních zařízení se zabývá celá řada vědců a vědeckých pracovníků. Jedním z nejvíce aktivních v této oblasti v současnosti je P. Mba, který uveřejnil bezpočet článků zabývajících se detekcí a lokalizací poškození, zejména na axiálních ložiscích [31, 32, 33]. V uveřejněných pracích se zabývá aplikací akustické emise jako nástroje pro detekci vzniku a rozvoje kontaktního poškození na vzorcích z ložiskových materiálů a ložisek, jako doplňkové a porovnávací měření je použito vibračních akcelerometrů. Standardní součástí testovací výbavy v experimentu [31] 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 je zaměřen na identifikaci vzniku a rozvoje mikrotrhlin v materiálu ložisek, zvláště pak detekování vzniku a šíření podpovrchových trhlin, až do rozvoje 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 min^{-1} . Testované ložisko s celou testovací stanicí jsou zobrazeny na obr. 2.21.



Obr. 2.21 Testovací stanice s detaily jednotlivých částí [31].

Pro snímání byly použity čtyři snímače akustické emise (PICO) s operačním rozsahem 200 kHz – 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 hity vzorkovacích frekvencí 2 MHz a ostatní parametry (Counts, RMS, průměrná hladina signálu, maximální amplituda a absolutní energie). Měření doplňoval jeden akcelerometr umístěný na speciálním pouzdru pro měření vibračního zrychlení v axiálním směru.

Experiment obsahuje dvě případové studie s různým stupněm zatížení ložiska. Jako příklad je uvedena část vstupních dat a předpokládaná životnost uzavírající výpočet studie viz tab. 2.2. 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, viz. tab. 2.2. Druhá případová studie obsahovala změnu pouze ve velikosti zatížení, zatímco v první bylo celkové zatížení 50 000 N, ve druhé pouze 35 000 N.

Tab. 2.2 Část tabulky obsahující data pro případovou studii I [31].

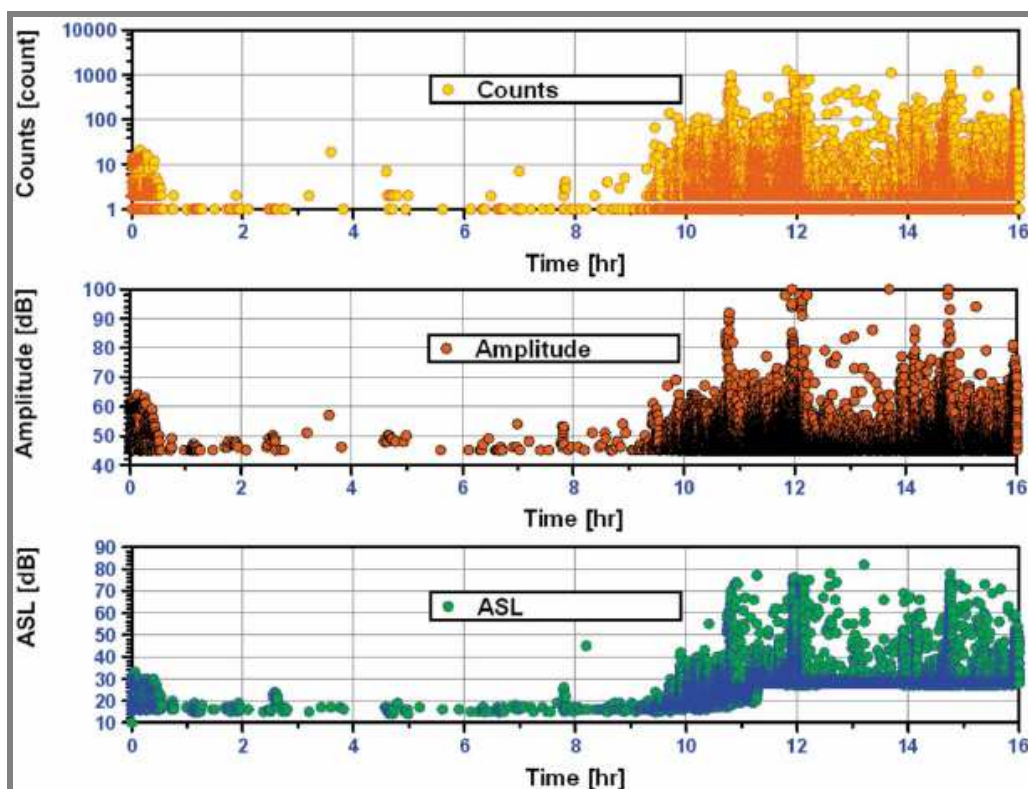
Table 1 Bearing life calculations for Case I		
Input data		
Load applied (N)	50000	
Number of balls	14	
Ball radius (mm)	5.75	
Race groove radius (mm)	5.8	
Mean bearing diameter (mm)	64	
Rotational speed (rpm)	72	
Thomas and Hoersh theory		
	Flat race	Groove race
Maximum shear stress (N/mm ²)	2215	628
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

Během zkoušky byly zaznamenávány časové parametry (Counts, Amplituda a ASL). Parametr ASL (dB) je definován jako průměrná hodnota amplitudy AE (výpočet z RMS (mV/100)) dle (2.31).

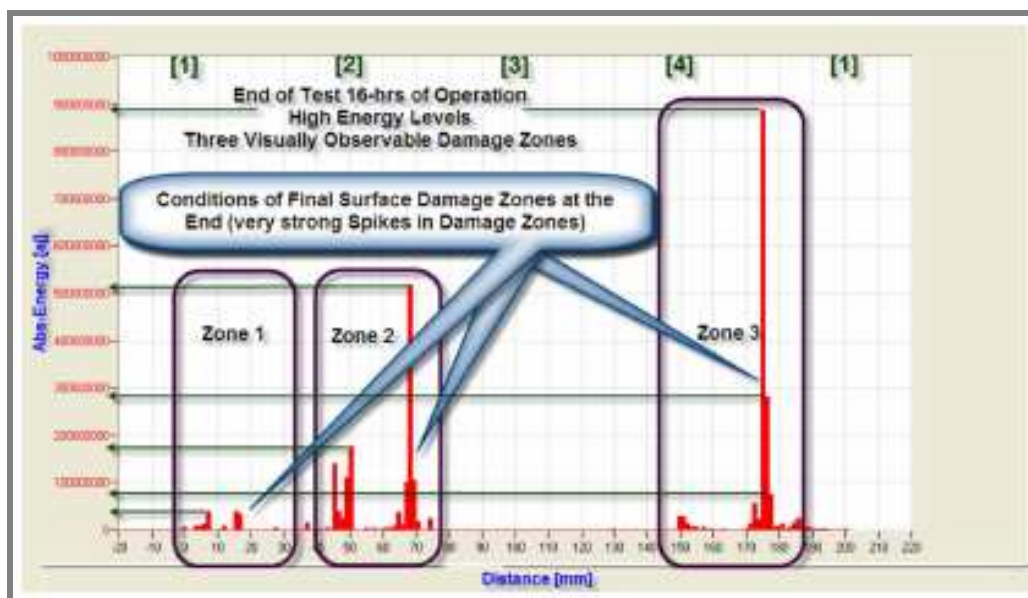
$$ASL = 20 \log_{10}(1,4 * RMS) \quad (2.31)$$

Při frekvenční analýze byly významné složky v 10. h měření na frekvenci 18 Hz, ke konci měření tj. 16. h (obr. 2.22) 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.



Obr. 2.22 Standardní sledované AE parametry v závislosti na čase v průběhu zkoušky [31].



Obr. 2.23 Lokalizace poškození testovaného kroužku případové studie I [31].

Vedle identifikace (časového) momentu vzniku kontaktního poškození zde byl i zájem určit místo vzniku poškození. Jak již bylo zmíněno na začátku experimentu, na zkoušeném kroužku byly symetricky umístěny čtyři snímače a pomocí Hsu-Nielsenova zdroje zde byla ověřována schopnost detekování místa zdroje AE

aktivity. Obrázek 2.23 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 odpovídají oblastem, v nichž se výsledné poškození objevilo.

Obrázek 2.24 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).



Obr. 2.24 Výsledné poškození testovaného kroužku [31].

Příspěvek, 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. 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 experimentech 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. 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 (vhodné umístění snímačů AE přímo na kroužek, nebo do jeho těsné blízkosti).

2.4.2 Diagnostika velkých ložiskových elementů

Lokalizací poškození ložisek se zabývá také L. M. Rogers. Ve svém článku [34] uveřejnil experimentální zkoumání nadměrně zatížených velkých ložiskových elementů, které se využívají například při otáčení vysokých pracovních jeřábů, nebo jsou využívány v pohonech lodních jednotek. Pro detekci poškození je použita

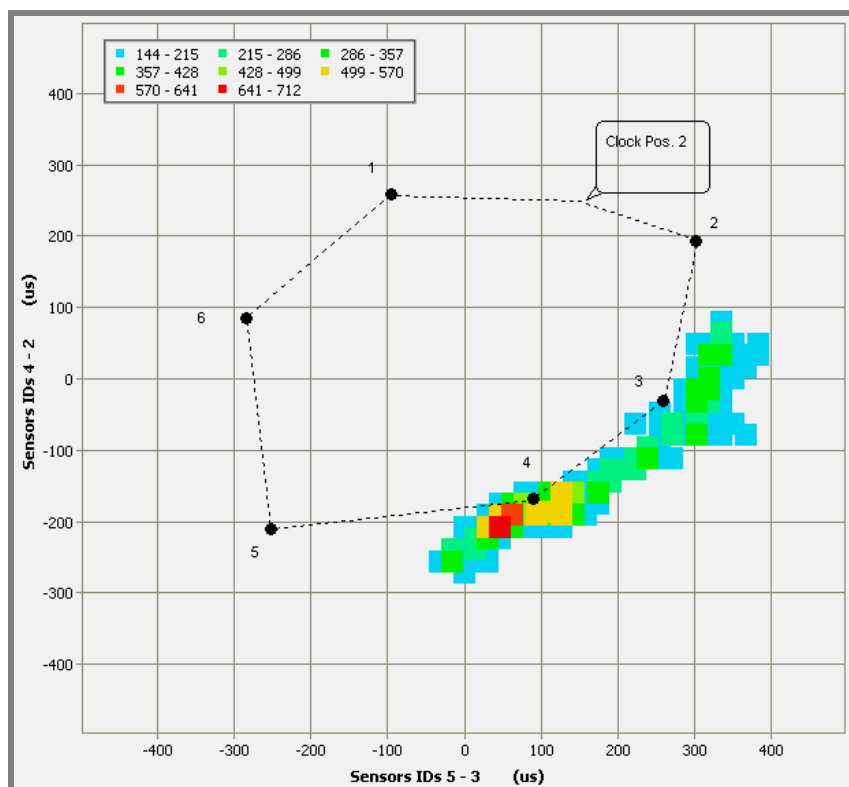
metoda akustické emise při hodnocení velikosti intenzity signálu a identifikace místa vzniku akusticko-emisních zdrojů. K experimentu byly použity jak radiální ložiska, tak i axiální ložiska s kuželíkovými valivými elementy vyobrazené na obr. 2.25, které jsou součástí pohonu námořních lodí. Už vzhledem k velikosti ložisek je správný předpoklad poměrně malých otáček. Vedle lokalizace místa vady (obr. 2.26) a celkové míry intenzity signálu se autoři zabývali i hledáním odezvy poškození ve frekvenční oblasti.

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. 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 $28,5 \text{ min}^{-1}$, pro druhé zkoušené axiální ložisko připadlo 45 min^{-1} a radiální ložisko bylo vystaveno 80 min^{-1} .



Obr. 2.25 Ukázka testovaného ložiska [34].

Jak je patrné z obr. 2.26, 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. Ve spektru je patrné charakteristické poškození vnitřní dráhy ložiska ($5,20 \text{ Hz}$) i se svými harmonickými složkami. Toto poškození odpovídá zhruba jedenáctinásobku otáčkové frekvence. Zkoušení druhého ložiska s menším poškozením vykazovalo podobné výsledky s předešlým měřením. Také zde bylo poškození vnitřního kroužku a chybová frekvence ($8,22 \text{ Hz}$) 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 oblasti nejvyššího zatížení ložiska.



Obr. 2.26 Lokalizační diagram AE aktivity [34].

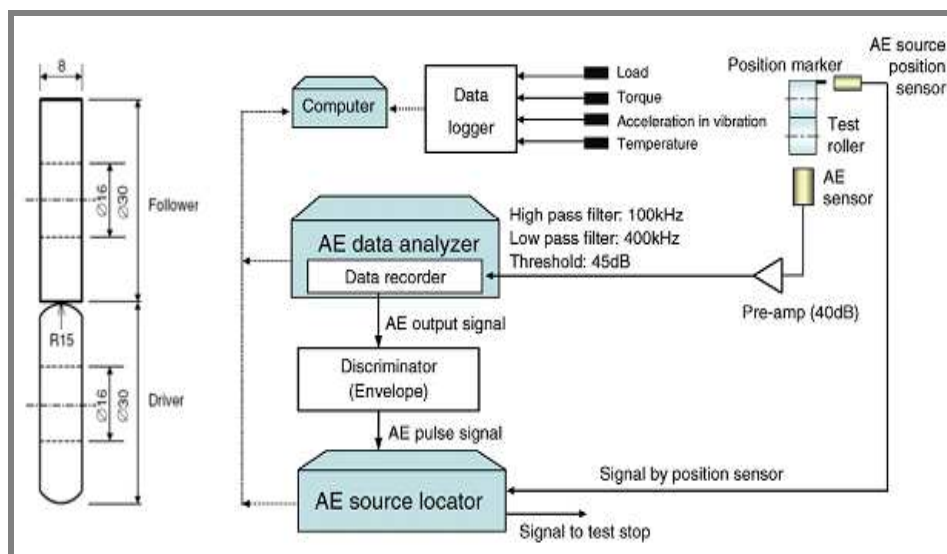
2.4.3 Detekce a lokalizace kontaktní únavy válcových těles

2.4.3

Lokalizaci poškození se zabývá také M. Z. Rahman, který uveřejnil vědecký článek věnovaný získání poznatku počátku kontaktního poškození a jeho lokalizaci na dvou radiálně zatížených kotoučích. Monitorování poškození bylo zaměřeno na opotřebení radiálních kol (zejména kol železničních vozů). 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 [35].

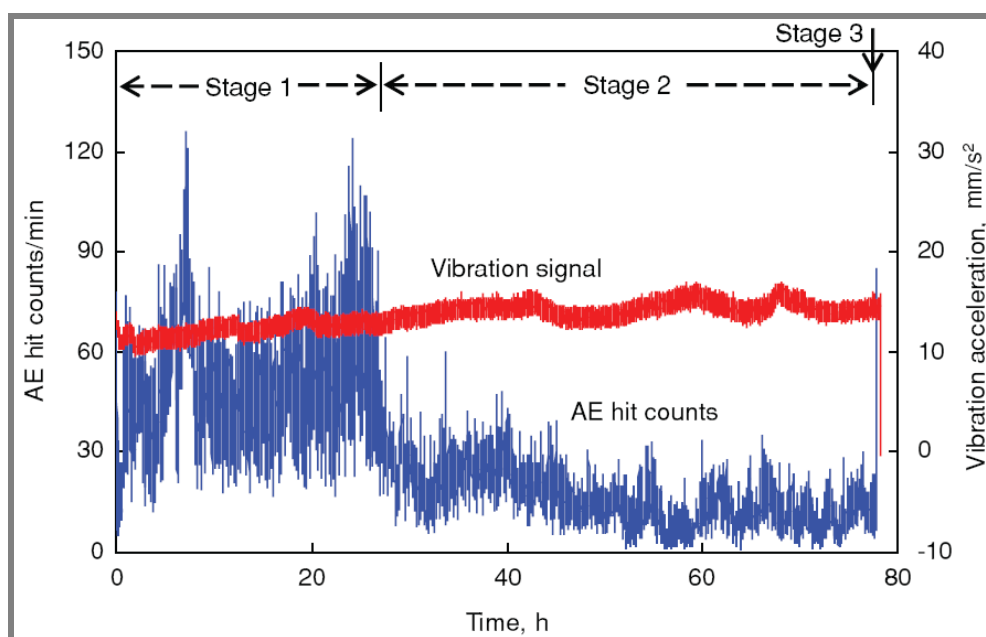
Pro experiment byly použity dva kotouče, jejichž geometrie je ukázána na obr. 2.27. Hnací kotouč se zakřiveným profilem byl vyroben z kalené nízkolegované oceli (SNCM420), pro hnaný kotouč s přímým profilem byla použita indukčně kalená ocel (S40C). Oba válce měly před spuštěním experimentu drsnost R_z 1.0 – 2.0 μm . Obrázek 2.27 zobrazuje také schematický diagram celé testovací procedury. Senzor akustické emise byl umístěn na spodku olejové vany a výstupní signál byl zesílen o 40 dB. Druhý senzor 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 senzor, vibrační akcelerometr, senzor monitorující teplotu oleje, počítadlo otáček a již zmiňované dva snímače AE.

Zastavení testu bylo vztaženo k překročení počtu překmitů přes stanovenou prahovou hodnotu pro každý jednotlivý úsek kotouče. V tomto případě je vypnutí zkoušky připisováno hodnotě 15 překmitů za dobu 2 minut. Během testu byl použit maximální tlak 4,0 GPa za podmínky bodového kontaktu s rychlostí otáčení hnaného válce 800 min^{-1} a poměrem prokluzu pevných kol okolo 9 %. Mazání kontaktu probíhalo převodovým olejem API GL-5 (viskozita 178 mm^2/s při 40 °C a 17 mm^2/s při 100 °C, hustota 0.887 g/cm^3).



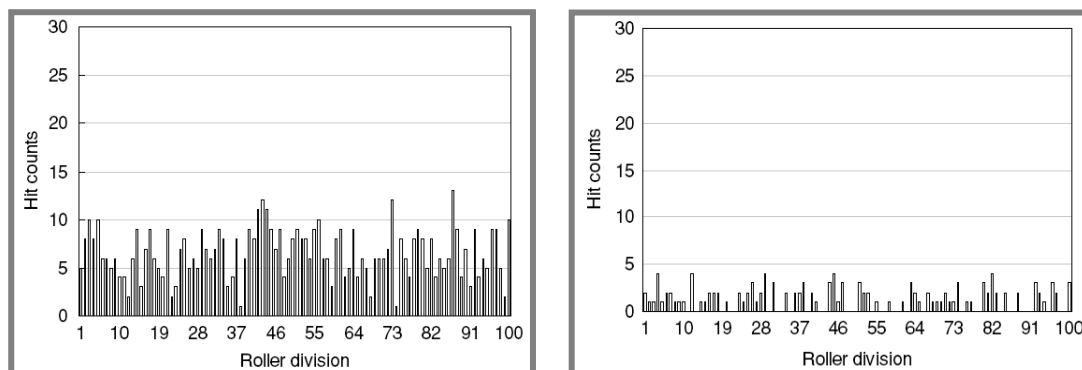
Obr. 2.27 Geometrie testovaných válců a schematický diagram sběru dat [35].

Průběh celého záznamu zkoušky je znázorněn na obr. 2.28, kde je zobrazena závislost počtu překmitů AE za minutu 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), dále následuje oblast 2 pojmenovaná 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.



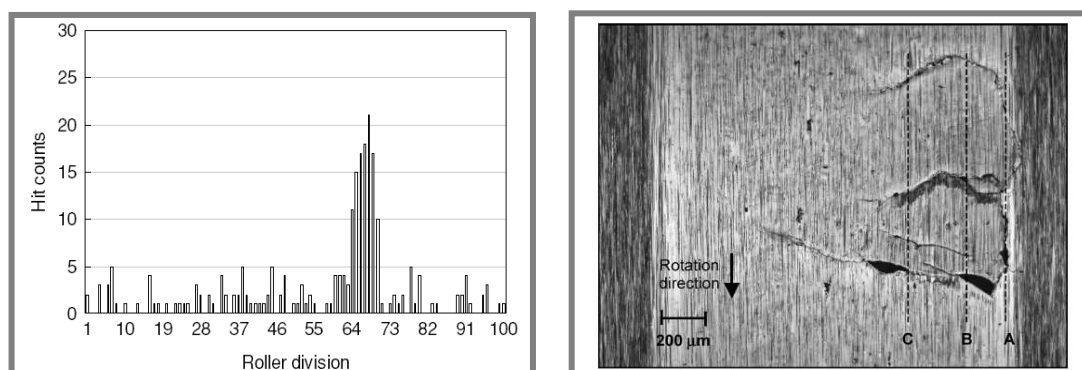
Obr. 2.28 Poměr počtu zásahů AE / min a zrychlení vibrací během testu [35].

Záznam AE na obr. 2.29 (vlevo) dokládá toto rozložení ve 24. hodině po spuštění zkoušky, tedy ke konci prvního stádia a záznam na obr. 2.29 (vpravo) zobrazuje rozložení 10 minut po 60 hodině (stádium 2). Ani na jednom záznamu není překročena hodnota 15 *Hit Counts*, která charakterizuje okamžik ukončení zkoušky.



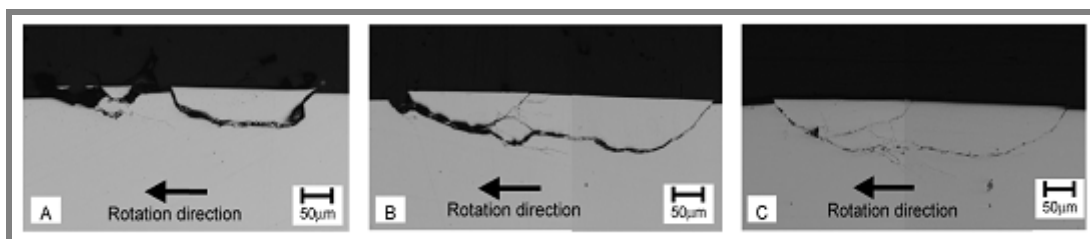
Obr. 2.29 Záběhový stav (vlevo) a ustálený stav (vpravo) [35].

Autoři článku uvádějí typický popis amplitudy AE hitu v oblasti od 45 dB (0.017 V) 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 zvýšením signálu a značnou periodicitou (praskavého signálu) jako důsledek rozvinutého poškození v jednom místě hnaného kotouče. Obrázek 2.30 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. 2.30 AE překmitů 10 minut před ukončením zkoušky (vlevo) a morfologie poškození povrchu (vpravo) [35].

První známky poškození byly objeveny vždy na hnaném kotouči z indukčně kalené oceli (S40C) s přímým profilem stykové plochy a toto poškození bylo rozlišitelné již pouhým okem (oblast na válci označena číslem 67). Úbytek hmotnosti hnaného kotouče byl $0,3 \text{ mg} \pm 0,05 \text{ mg}$ a hnacího $0,25 \text{ mg} \pm 0,05 \text{ mg}$. Průměrný moment byl $0,04 \text{ N}\cdot\text{m}$ a maximální teplota oleje nepřesáhla 50°C . Obrázek 2.30 (vpravo) ukazuje snímek povrchu kotouče, na kterém je počáteční poškození, jež 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 je znázorněn na obr. 2.31 s ukázkou šíření trhliny z místa vzniku pod povrchem kotouče.



Obr. 2.31 Pohled na průřez poškození hnaného válce [35].

2.4.4

2.4.4 Zhodnocení lokalizačních postupů

Experimentální zjišťování počátku vzniku a rozvoje kontaktního poškození rotujících částí (kotoučů, kroužků) a ložisek prokázalo, že akustická emise je úspěšnou metodou identifikace a lokalizace poškození. Základem úspěchu je umístění snímače AE do blízkosti zkoušeného vzorku, nejlépe na jeho povrch. Při umisťování snímačů přímo na povrch zkoušeného vzorku jsme omezeni možnostmi a rozměrem vhodných ploch. Metoda AE je natolik citlivá, že je schopna detekovat poškození i zprostředkovaně, tzn. na rámu stroje, ložiskovém domku, či olejové vaně.

Pro úspěšnou lokalizaci je nutné, aby rozložení snímačů AE bylo okolo vyzařujícího zdroje, z časových interferencí lze pak dopočítat vzdálenosti ke zdroji. Takto se lokalizace využívá zejména při lokalizaci poruchy tlakových nádob, mostních konstrukcí a ve speciálním případě i na kroužku axiálního ložiska [31]. Lokalizace poškození na rotujících dílcích je problematičtější a v těchto případech bývá nutné doplnit experimentální soustavu snímačem polohy, který v kombinaci s detekcí AE signálu dokresluje polohu vznikající poruchy [35].

2.5

2.5 Vazebné prostředí

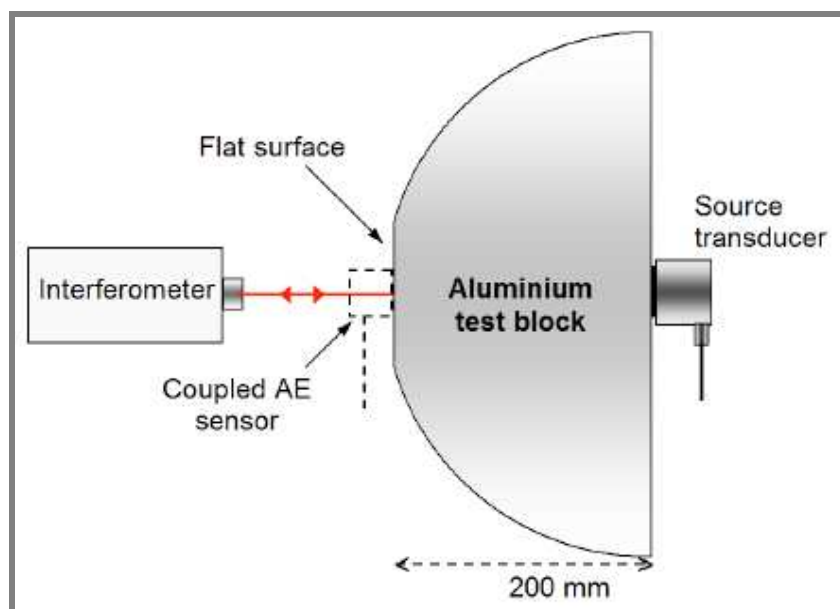
2.5.1

2.5.1 Rozbor a analýzy vazebných prostředí

Přítomnost vazebného prostředí mezi snímačem a snímaným povrchem má velký význam na kvalitu i kvantitu přenesených vln. Literatura [36] uvádí, že 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 čtyři řády vyšší hodnoty, než má vzduch. 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 [36].

Problematické vazebných prostředí dosud nebylo věnováno příliš mnoho pozornosti, ale s rozvojem ultrazvukových gelů a kyanidových hmot se touto oblastí začínají vědečtí pracovníci stále více věnovat. Některé dílčí poznatky uveřejnil P. Theobald [36] a S. Colombo [37]. P. Theobald se zabývá zejména kalibrací snímačů AE využitím laserové interferometrie a ve výsledcích hraje významnou roli i zvolené vazebné prostředí. Obrázek 2.32 zobrazuje použitou experimentální

soupravu, která se skládá z polokulového hliníkového bloku ($D = 410 \text{ mm}$) s plochým vrchem o poloměru $R = 50 \text{ mm}$. 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 vazebního povrchu.



Obr. 2.32 Schéma použité měřicí aparatury [36].

Zdroj podélného vlnění je 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. Po ustálení rychlostní historie vln z povrchu následuje opakované upevňování snímače AE s různými vazebnými hmotami na místo předtím snímané laserovým interferometrem. Ke zpřesnění opakovatelnosti měření a možnosti porovnání byl snímač vždy přitlačován k povrchu silou o velikosti 6 N [36].

Pro testovací experiment byly použity čtyři druhy vazebných prostředí:

Glycerín ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) – 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 .

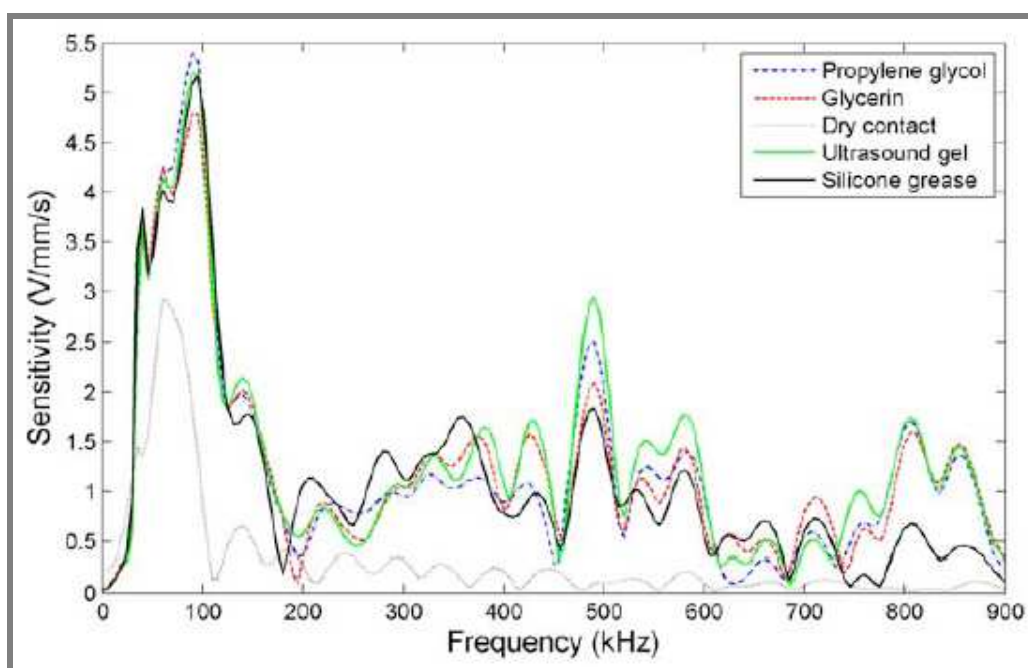
Propylenglykol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) – viskózní kapalina bez barvy a zápachu, lze získat z glycerinu při výrobě bionafty, $\rho = 1,036 \text{ g/cm}^3$.

Ultrasound gel – viskózní gel užívaný jako vazebné prostředí mezi povrchem zkoumaného objektu a ultrazvukovou sondou.

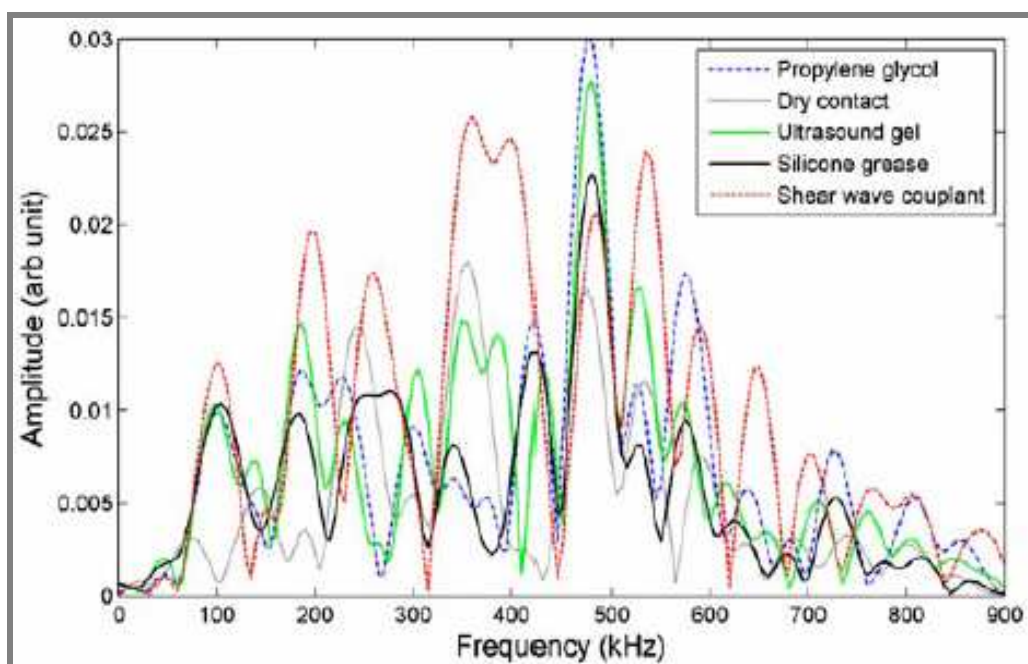
Silicone grease – voděodolná viskózní pasta, složená kombinací silikonového oleje a zahušťovadla.

Citlivostní výsledky všech použitých vazebních prostředí na senzoru AE ukazuje obr. 2.33, 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 vyšší.



Obr. 2.33 Citlivost snímače S9280 pro podélné vlnění různých vazebních prostředí [36].



Obr. 2.34 Citlivost snímače S9280 pro příčné vlnění různých vazebních prostředí [36].

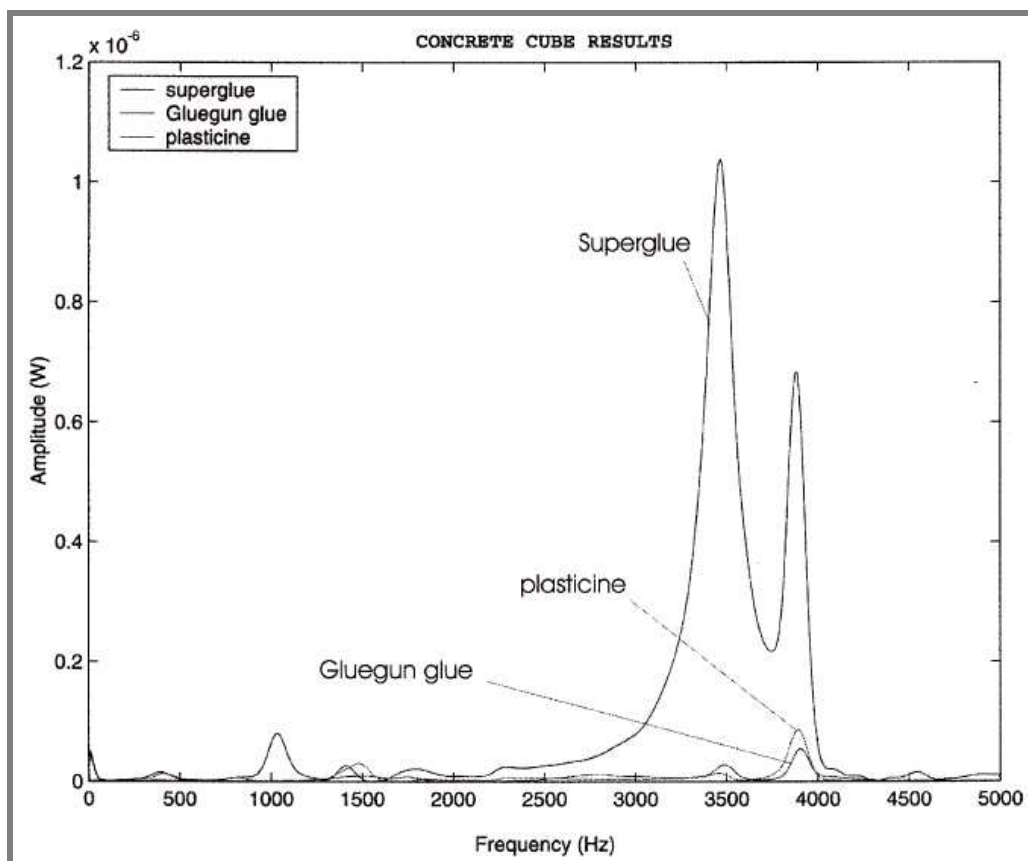
Obrázek 2.34 zobrazuje odezvu frekvenčního spektra senzoru AE na generování příčného vlnění zdrojem za použití suchého styku a vazebných prostředí: *propylene glykol*, *ultrasound gel*, *silicone grease* a speciálně navrženého značně viskózního prostředku k vysoké citlivosti detekce příčných vln (*shear wave couplant*).

Z frekvenčního průběhu jednotlivých vzorků je patrné, že suchý kontakt již není zanedbatelný, jak tomu bylo u odezvy podélných vln, dokonce je porovnatelný s vlastnostmi *silicone grease*. Z uvedeného průběhu je možné předpokládat menší citlivost vazebného media k přenosu příčných vln 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 vytvořená báze, nicméně velmi dobrou odezvu měly i ke své nízké viskozitě *ultrasound gel* a *propylen glycol*.

Dalším kdo experimentálně zjišťoval vhodné charakteristiky vazebných prostředí je S. Colombo. Ve svém článku [37] se zabývala některými praktickými faktory zkoušených vazebných prostředí vzhledem ke kvalitě přenesených signálů ze snímaného povrchu, pevností spoje, uvolnění spoje po snímání a jiných. Práce je zaměřena především na hledání alternativ ke kyano-akrylátovým lepidlům, které mohou být příčinou poškození těla snímače. Složky které byly podrobeny zkoušení jsou následující: *superglue* - kyanoakrylátové lepidlo, vosk, silikonové mazivo (RS-Components), plastelína, vazelína ve spreji (RS-Components), tmel (Uni-bond-Henkel), lepicí pásky (Pritt Sticky Pads) a tavné lepidlo (Hot gluegun-Loctite).

Parametry hodnocení použitých složek byly: *kvalita nasnímaného signálu* – frekvenční obsah a amplituda, *přizpůsobivost k povrchu*, *opakovatelnost měření* – dostatečná kvalita výsledků při opakovaných zkouškách, *pevnost spoje* – při dlouhodobých měřeních, *jednoduchost aplikace*, *možnost lehkého odstranění*, *limity použití* a *čas* pro ustavení. Pro vyhodnocení parametrů signálu byly použity vibrační akcelerometry, budičem byla ložisková kulička a impulsní kladivo. Experimenty probíhaly na dvou zkušebních tělesech, prvním byla betonová deska, na které byly rázy vytvářeny impulsním kladivem, druhým pak betonová krychle, na kterou dopadala ložisková kulička (průměr 13 mm). Vyhodnocování nasnímaných dat probíhalo v softwaru *MATLAB*.

V průběhu zkoušení vypadly některé vazebné materiály: lepicí páska – velmi špatná odezva signálu v časové oblasti (amplituda). Vosk a silikonové mazivo byly vyjmuty z důvodu obtížné instalace, teplotní stálosti a pošpinění povrchu. Vazelína ve spreji a tmel byly rovněž vyřazeny z důvodů dlouhé doby přípravy na měření a času strávenému při odstraňování těchto složek ze snímače a snímaného povrchu. Kyanidové lepidlo, plastelína a tavné lepidlo byly analyzovány jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti. Nejlepší výsledky jsou dosahovány u kyanidového lepidla, podstatně horší výsledky vykazuje plastelína těsně za ním je tavné lepidlo. Výsledky se shodují v časové i frekvenční oblasti, průběh citlivosti dokládá obr. 2.35. Tabulka 2.3 zobrazuje ohodnocení jednotlivých zkoušených složek podle sledovaných parametrů.



Obr. 2.35 PSD zkoušených vazebných prostředí [37].

Tab. 2.3 Přehled sledovaných parametrů vybraných vazebných prostředí [37].

Transducers mounting substances: final assessment table				
Criteria	Superglue	Plasticine	Gluegun glue	Grease
Quality of received signals	5	3	2	2
Adaptability	3	5	5	4
Repeatability	5	5	5	2
Durability	5	3	5	2
Ease of installation	4	4	3	2
Ease of removal	1	5	4	4
Location limitations	5	5	3	5
Time to set	3	5	4	4
Total/40	31	35	32	25

Podobně jako P. Theobald při kalibraci snímačů [36] se A. Fasana zabývá modelováním a experimentálními zkouškami detekce podélných a příčných vln a jejich kombinací (Rayleigh vlny) [38]. Experimentální zkoušky A. Fasany jsou rovněž zaměřeny na porovnávání různých vazebných prostředí. Experiment probíhal na hliníkovém plechu (1000 mm x 1000 mm a tloušťce 4 mm). Uprostřed plechu byl

umístěn emitor vln a do čtyř směrů byly rozmístěny snímače AE. Pro uchycení emitoru byl použit speciálně vytvořený upínací přípravek upevněný k povrchu kyano-akrylátovým lepidlem. Autor porovnával jednotlivé složky podobně, jako je zkoušela S. Colombo. Tabulka 6.2 představuje výsledky experimentálních porovnání jednotlivých zkoušených složek. První položka tabulky představuje suchý kontakt mezi snímačem a povrchem, má také nejhorší sledované parametry. Parametry kterými byly porovnávány jednotlivé složky, jsou maximální amplituda (Amplitude), počet překmitů signálu přes pevný práh (Counts), v tomto případě se jednalo o 45 dB a energie plochy signálu (Strength).

Složka na druhém řádku tabulky 2.4 je adresována kyano-akrylátovému lepidlu a vykazuje velmi dobré odezvy ve všech sledovaných parametrech. Použití vosku zprostředkovává rovněž relevantní výsledky, ale jeho teplotní stálost je podstatně omezena. Mazivo (Grease) o tloušťce cca 2 mm je v parametrech průměrně horší než vosk a ve většině případů musí být snímač zajištěn ještě upínacím přípravkem. Oboustranná lepicí páska příliš mnoho utlumuje signál a je hodnocena jako nejhorší. Poslední složkou tab. 2.4 je vinylové lepidlo, které se jeví jako nejlepší varianta a v parametru *Strength* vykazuje ve srovnání s ostatními zkoušenými prostředími několikanásobně vyšší citlivost [38].

Tab. 2.4 Přehled výsledků odezvy signálu vybraných vazebných prostředí [38].

Couplant	Amplitude [dB, ref: 1μV]			Count			Strength [μV s]		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
—	55	64	46	747	751	743	3015	3926	2135
Adhesive 1	80	80	80	3735	3741	3729	6794	6995	6500
Wax ≈ 1mm	73	73	73	2164	2170	2157	8465	9153	7098
Grease ≈ 2mm	75	75	75	1881	1886	1875	4353	4604	4116
Tape	46.8	46	47	1811	1821	1804	856	859	854
Adhesive 2	69	92	46	6268	6276	6251	29080	60740	14720

2.5.2 Zhodnocení vazebných prostředí

Obecně o zvýšení citlivosti odezvy AE snímačů za použití vhodného vazebného prostředí není jakýchkoli pochyb. Použité složky se mohou lišit různými vlastnostmi (pevnostní spoje, amplitudový útlum signálu, rozdíly v signálu ve vyšších frekvencích). Správně zvolené vazebné prostředí hraje bezesporu zásadní roli pro co nejkvalitnější 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 vzorců (2.32 a 2.33). Jen pro porovnání, impedance oceli je přibližně $Z = 46 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a například testovaného glycerinu $Z = 2,46 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Porovnáním hodnot oceli a glycerinu je rozdíl daleko menší, než např. u vzduchu.

$$Z = \frac{p}{v \cdot S} (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.32)$$

$$Z = \rho \cdot c (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (2.33)$$

kde: Z – akustická impedance; p – akustický tlak vlny; v – rychlost částice (vlnění); c – rychlost šíření akustického vzruchu v prostředí (rychlost zvuku); 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 vazebné prostředí je schopnost vytěšňovat z místa styku vzduchové bubliny a teplotní odolnost a stálost při delších zkouškách. Mezi zohledněné faktory patří také vhodná viskozita a dobrá smáčivost substance. Z dosavadních výsledků jsou pozorovány nejlepší vlastnosti zejména u kyano-akrylátových lepidel a výborných výsledků dosahují i vinylová lepidla. Tyto složky však s sebou nesou i problémy s uvolňováním jejich spojů a odstraňováním zaschlých vrstev zejména z povrchu snímače. S výhodou kvalitního přenosu signálu a jednoduchého odstranění po měření lze použít ultrazvukové gely, jejichž vlastnosti jsou stále zdokonalovány (některé gely lze použít i při vysokých teplotách).

2.6

2.6 Poškození ložisek

Vedle přirozeně utvářeného poškození během únavových zkoušek je možné poškození rovněž simulovat. Umělé poškození je vytvářeno primárně z důvodu urychlení experimentálních zkoušek, ze kterých je pak možné analyzovat data získaná z definovaného poškození (vyjiskření, vryp, kontaminace,...) z určité části zkušební vzorku (kroužek, nebo valivý element). Primárním cílem uměle vytvořeného poškození je však simulovat reálné poškození. Následně z výsledků těchto experimentálních měření získat informace popisující vznik a šíření podobného poškození. Detailním zmapováním analýz různých typů, velikostí a umístění umělého poškození by mělo být možné tyto odezvy v signálu nalézt i v reálných podmínkách (v provozu). Provozní podmínky s sebou přináší další problémy, jako například prolínání více vstupních iniciací poškození (kroužek + valivé tělísko) a prakticky vždy přítomný okolní šum.

2.6.1

2.6.1 Uměle vytvořené poškození

Vytvoření umělého poškození na ložiscích s následným snímáním velikosti signálu je stále aktuální problematikou. Pro radiální ložiska (nejvíce používaná) je vytvoření a odměření vytvořeného poškození značný problém (zejména u menších ložisek). V tomto případě je možnou variantou použití speciálních dělených ložisek, avšak tato je značně finančně náročnější. Tvorba umělého poškození a následné dokumentování (focení) na axiálních ložiscích je podstatně jednodušší (přístup ke kroužkům), i proto se většina autorů zabývá především axiálními ložisky [31]. Nejčastěji používaná metoda tvoření umělého poškození je elektrojiskrovým obráběním, tento způsob vyjiskřuje materiál z povrchu zkoušeného tělesa (např. kroužku) a lze jím poměrně dobře simulovat vznik pittingu [8]. Umělý defekt lze vytvářet také broušením (diamantové brusné stopkové těleso), nebo tvářením za studena - vytlačené vpichy do povrchu materiálu.

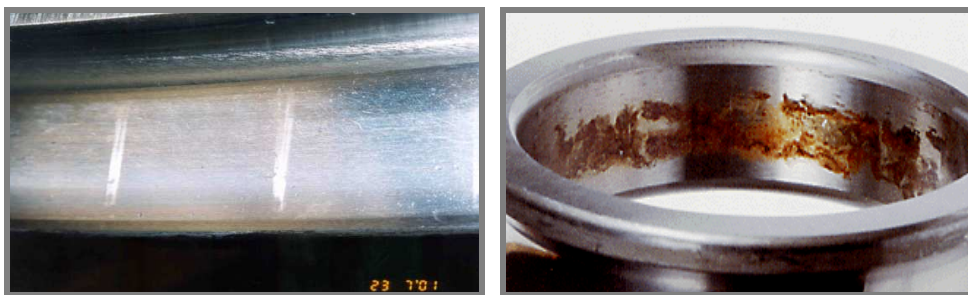
2.6.2

2.6.2 Přirozeně vytvořené poškození

Přirozené poškození lze rozdělit do tří základních oblastí a to je poškození ložisek při výrobě, montáži a během provozu. Tato práce se zabývá diagnostikou ložiskových poruch vzniklých za provozu, které lze rozčlenit do několika kategorií [39].

Mechanické opotřebení – vzniká oddělováním malých částí materiálu cyklicky namáhaného povrchu vzorku, při kterém do povrchových vrstev vnikají různé nerovnosti povrchu, nečistoty a vznikají mikrosvary. V naprosté většině reálných případů dochází také k prokluzu a vydírání vrchních vrstev materiálu. Během únavové životnosti cyklicky namáhaných součástí dochází k opakovanému a nesčetnému utváření poškození velmi tenkých povrchových vrstev materiálu (v řádu mikrometrů) a opětovnému zahlazování. Při vypadávání větších částí materiálu vzniká tzv. *pitting*, který je postupným působením namáhání rozšiřován do větších oblastí tzv. *spalling*, viz. obr. 2.24. Pevná hranice mezi těmito pojmenovanými poškozeními cyklicky namáhaného povrchu zatím není přesně definována.

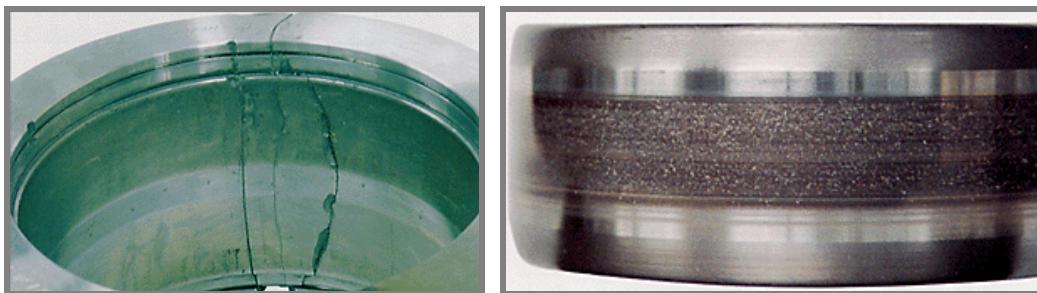
Tvorba rýh a důlků – je jedním z vážných typů poškození, nazývá se tzv. *false brinelling*. Jedná se o vznik rýh, nejčastěji kolmých na směr valení. Tyto rýhy vznikají působením nepříznivých radiálních, nebo axiálních sil (záleží na typu ložiska) při klidovém stavu. Tento typ poškození vzniká také při přepravě nadměrných ložiskových těles jako důsledek špatného uchycení uložení jednotlivých částí a následné přítomnosti vibrací. Ukázka poškození kroužku ložiska příčnými rýhami je na obr. 2.36 (vlevo).



Obr. 2.36 Poškození kroužku ložiska *FALSE BRINELLING* (vlevo) a *FRETING* koroze (vpravo) [34], [39].

Koroze způsobená třením – je dalším typem poškození ložisek. Jedná se o poškození kroužků ložisek na úložných plochách. Vlivem nepříznivého uložení s vůlí může nastat pohyb kroužku s následnou oxidací poškozeného povrchu, tento typ poškození je nazýván tzv. *fretting* koroze, viz obr. 2.36 (vpravo).

Trhliny a lomy – jsou nebezpečné z hlediska náhlého vzniku a tím i nebezpečí havárie. Praskliny v ložisku jak zobrazuje obr. 2.37 (vlevo) vznikají zpravidla nadměrným zatížením, deformacemi kroužků vlivem chybného nalisování ložiska, nebo se mohou šířit z místa porušeného povrchu (*spallingu*, *flakingu*).



Obr. 2.37 Trhliny na vnitřním kroužku ložiska (vlevo) a vyjiskření na vnitřním kroužku ložiska [39].

Průchod elektrického proudu ložiskem – může způsobit jiskření mezi kontakty a poškození povrchu jak valivých elementů, tak i kroužků ložiska, viz obr. 2.37 (vpravo). V dnešní době se v průmyslových aplikacích citlivých k tomuto poškození mohou využívat ložiska s keramickými valivými elementy.

Ohřev a objemové popuštění – jsou způsobeny extrémními provozními podmínkami (nadměrné zatížení, nedostatek maziva, velké rychlosti otáčení, přívod tepla z vnějšku, atd.). Obecně platí, že se vnitřní kroužek ložiska vlivem své menší plochy zahřívá více (až o 30°) než kroužek vnější, ale v praxi spíše více záleží na samotné konstrukci uložení (odvodu tepla).

Poškození klece - zejména u přetěžovaných ložisek, kde dochází vedle nadměrného zatížení i ke zvyšování teploty nad povolené provozní hodnoty. Klece ložisek mohou být vytvořeny z různých materiálů (ocel, plast) a typů konstrukcí, u nejběžnějších - nýtovaných klecí může nastat poškození nýtu, nebo vedení, případně i roztržení klece.

2.6.3

2.6.3 Životnost ložiska

Životností ložiska se rozumí jeho schopnost plnit požadované funkce, pro které bylo navrženo. Životnost ložiska je doba chodu až do jeho přerušení i vlivem jiných příčin, než je únava materiálů. Za uplynutí životnosti lze například považovat: roztržení klece, prasknutí valivého tělesa, nebo kroužku ložiska, zadření ložiska, překročení určité teploty, nebo požadované přesnosti ložiska [40] [41].

2.6.4

2.6.4 Trvanlivost

Trvanlivost ložiska lze rozdělit na trvanlivost skutečnou a trvanlivost vypočtenou.

Trvanlivost skutečná

Trvanlivost skutečná je doba chodu ložiska až do vzniku dolíčkového opotřebení (*pittingu*) na některé z valivých ploch. Vyjadřuje se v počtu celkových otáček, nebo v počtu celkových hodin chodu při stanovené frekvenci otáčení. Vzhledem k velkému rozptylu skutečné trvanlivosti (až dvacetinásobné) slouží orientace dle vypočtené trvanlivosti.

Trvanlivost vypočtená

Trvanlivost vypočtená (základní trvanlivost) se získává ze série experimentálních zkoušek provedených za stejných podmínek pro 20 až 30 ložisek. S trvanlivostní pravděpodobností 90 % byla určena konstanta C (základní dynamická únosnost), která je uvedena v katalogích výrobců. Zatížení F lze doplnit násobením součiniteli (pravděpodobnosti havárie, použitého materiálu a provozními podmínkami). Podrobné informace lze nalézt například na www.zkl.cz – manuál konstruktéra. Existuje základní závislost mezi zatížením a trvanlivostí ložiska:

$$F^3 * L_N = konst. \quad (2.34)$$

$$konst. = C^3 \cdot 10^6 \quad (2.35)$$

$$L_N = \left(\frac{C}{F} \right)^m \cdot 10^6 \quad (2.36)$$

$$L_h = \left(\frac{C}{F} \right)^m \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (2.37)$$

kde:

C (N) – dynamická únosnost kul. ložiska

F (N) – zatížení kul. ložiska

m (-) – exponent charakterizující typ valivých elementů

L_N (ot) – celkový počet otáček (trvanlivost ložiska)

L_h (h) – celkový počet hodin (trvanlivost ložiska)

n (min^{-1}) – otáčky hnacího ústrojí

Uvedené rovnice (2.34 až 2.37) mají omezení pro extrémní (maximální a minimální) hodnoty zatížení, frekvenci otáčení, velikosti teploty, maziva a další [41].

3 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem dizertační práce je zpřesnit diagnostiku vzniku poruch ložisek aplikací metody akustické emise. Význam této diagnostiky lze nalézt například u ložisek vystavených specifickým podmínkám (např. ložiska turbín), které je nutné monitorovat takřka nepřetržitě. Experimentální výzkum je zaměřen na jednodušší ložiska, s prvořadým úkolem zaznamenat počátky kontaktního opotřebení v charakteru snímaného signálu, které by následně bylo možné aplikovat v průmyslových podmínkách.

Naplnění tohoto cíle předpokládá realizaci následujících dílčích cílů

- * Vypracování postupu identifikace vzniku poškození radiálních ložisek metodou AE.
- * Návrh a zajištění konstrukčních úprav zkušebních stanic SA67.
- * Optimalizace nastavení měřicího řetězce s vypracováním návrhu postupu pro společné měření signálu AE, vibrací a teploty.
- * Realizace hlavní části experimentů na ložiscích typu 6204 a rozbor datových souborů s přiřazením změn parametrů signálu k charakteru a rozsahu poškození.

4 EXPERIMENTÁLNÍ APARATURA

4

4.1

4.1 Zkoušky životnosti radiálních ložisek

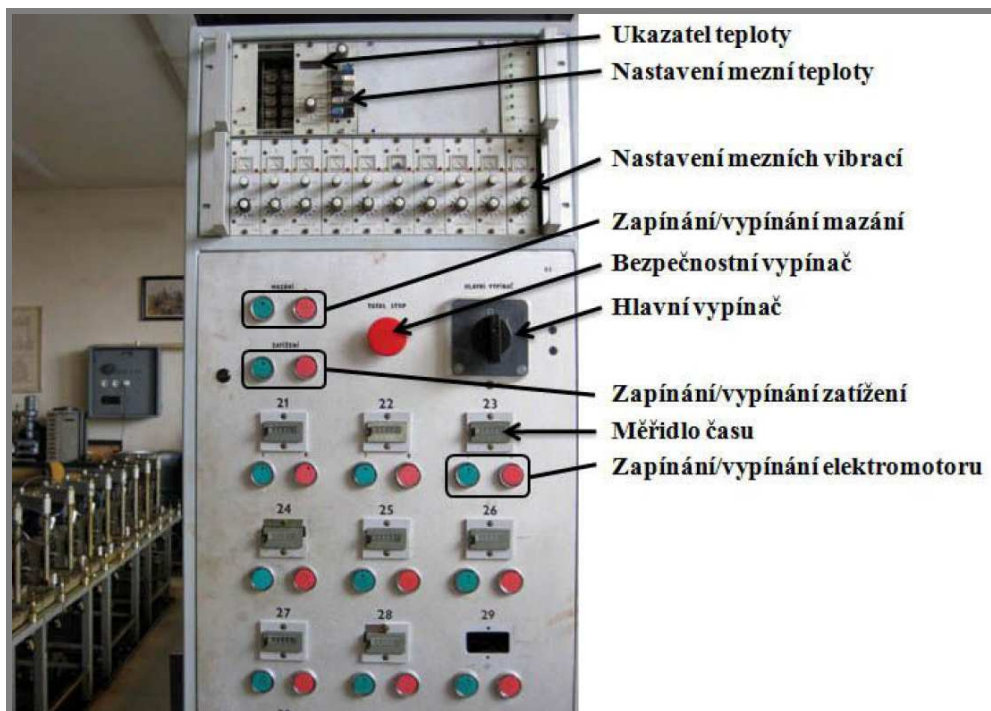
Ústav konstruování Fakulty strojního inženýrství v Brně disponuje laboratořemi pro experimentální zkoušky ložisek a ložiskových materiálů (laboratoř trvanlivosti ložisek a laboratoř kontaktní únavy). Laboratoř trvanlivosti ložisek je vybavena převážně experimentálními stanicemi s označením SA67, které slouží pro zkoušení radiálních ložisek. Jedna ze série stanic je zobrazena na obr. 4.1. Tyto stanice jsou určeny pro zkoušení radiálních ložisek různých velikostí, přičemž mezní rozměry jsou dány možnostmi stanic. Standardní uzpůsobení je nastaveno pro ložiska s typovým označením 6204. Stanice jsou navrženy převážně pro dlouhodobé trvanlivostní zkoušky, při kterých se ze série (například 10 ložisek) získávají experimentálně získaná data, která je možné následně porovnávat s výpočetními předpoklady (životností, trvanlivostí ložiska).



Obr. 4.1 Zkušební stanice SA67 [42].

Pro dlouhodobé trvanlivostní zkoušky jsou stanice vybaveny možností mazání olejovou lázní nezakrytovaných ložisek. Při vhodném nastavení mazání a přitlačné síly, mohou tyto zkoušky simulovat reálné provozní podmínky, kde zkoušená ložiska dosahují velkých životností (desítky tisíc minut). Vedle dlouhodobých zkoušek je možné provádět také zrychlené zkoušky způsobené změnami vstupních podmínek, jako jsou zvýšení zatížení, změna geometrie stykových ploch, velikost mazání, nebo uměle vytvořené poškození.

Stanice SA67 jsou ovládány kontrolním panelem, jeho popis je zřejmý z obr. 4.2. Panel umožňuje zapnutí a vypnutí stanic, zaznamenává dobu zkoušky, monitoruje hladiny vibrací a teploty a při překročení zkoušku automaticky zastaví. Automatické zastavení zkoušky je způsobeno vlivem zvýšených vibrací, které jsou důsledkem přítomnosti únavového poškození, či nadměrným ohřevem jako důsledek zvýšeného tření. V případě zadření ložiska je poslední ochranou spojka z pružného plechu umístěná mezi motorem a stanicí.

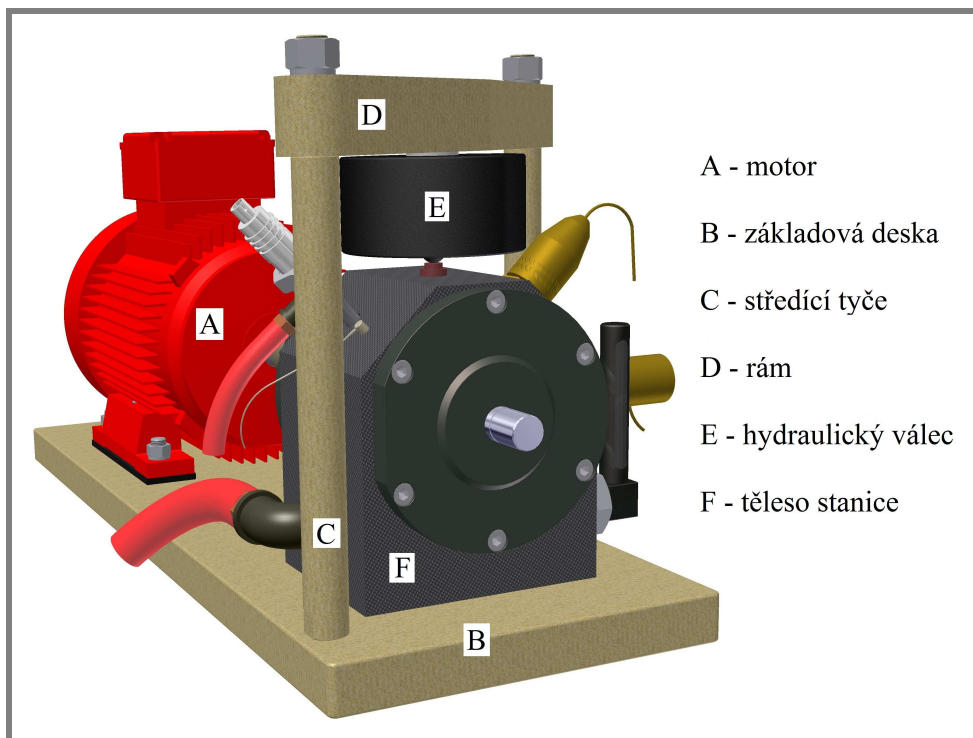


Obr. 4.2 Kontrolní panel stanice SA67 [42].

4.2

4.2 Popis a úprava experimentální stanice SA67

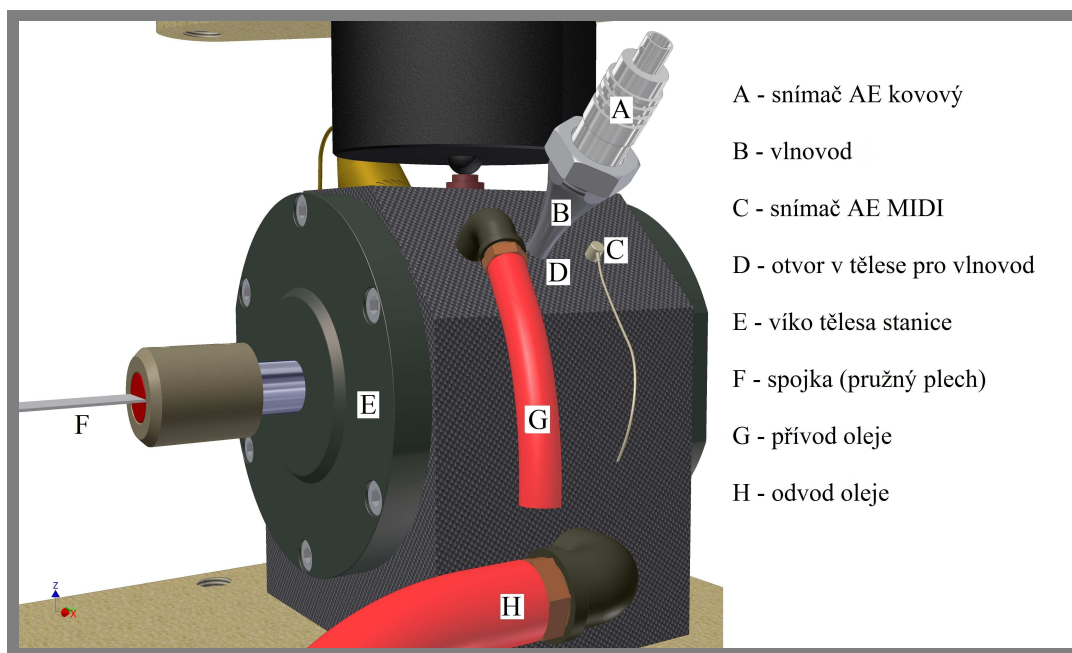
Obrázek 4.3 zobrazuje model se základním popisem vnějších částí, ze kterých je stanice složena. Motor s výstupními otáčkami 2845 min^{-1} , je umístěn na jedné základové desce společně se stanicí kterou tvoří: středící tyče, rám, hydraulický válec a těleso stanice, ve kterém jsou umístěny klíčové součásti pro zkoušení.



Obr. 4.3 Model stanice SA67 - pohled zepředu.

Obrázek 4.4 zobrazuje další vnější části stanice. Těleso stanice je z obou stran uzavřeno víky a tím dochází k zamezení únikům mazacího média (oleje). Přenos otáček motoru na hřídel stanice je zprostředkován pomocí spojky (pružný plech).

Původní uzpůsobení a možnosti stanice přinášely pouze informaci o celkové době zkoušky bez jakéhokoliv zaznamenání jejího průběhu. Díky řešení této dizertační práce a s přispěním řešení diplomové práce Ing. Suchánka [42] byly navrženy a realizovány konstrukční úpravy stanice pro možnost kontinuálního snímání AE z průběhu zkoušky. V rámci řešení projektu FRVŠ G1 1619/2009 byla zakoupena a do stanice implementována vibrační aparatura, umožňující zaznamenávat a vyhodnocovat vibrační signál v PC, přičemž je možné údaje o aktuálním stavu sledovat v reálném čase přes internet.

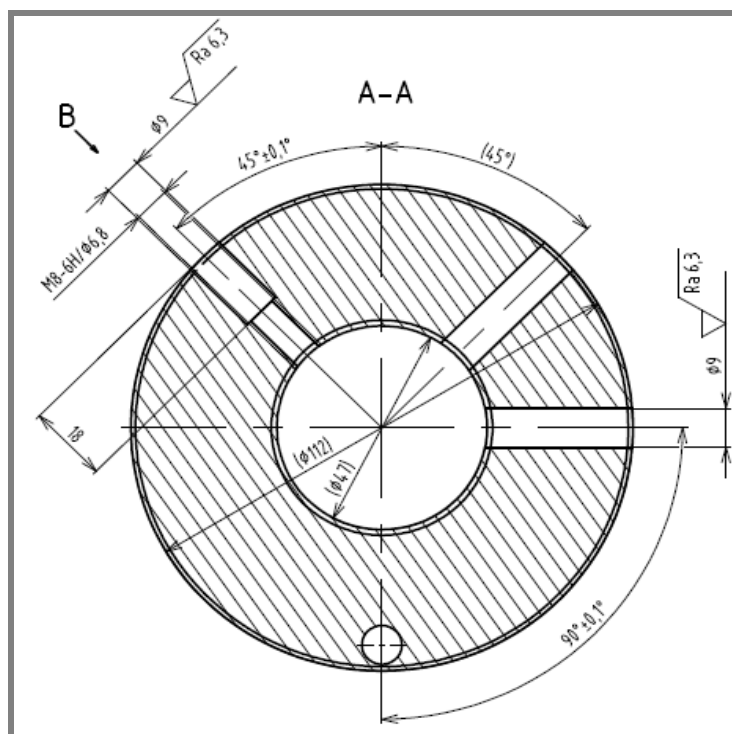


Obr. 4.4 Model stanice SA67 - pohled z boku.

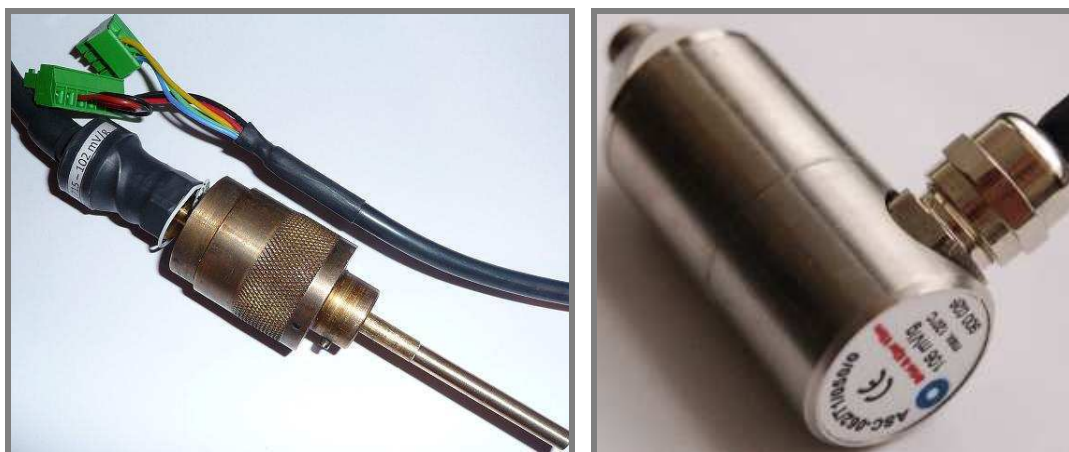
Konkrétní provedené kroky spočívaly v odměření a vyvrtání otvorů v *tělese stanice* a v *pouzdru*, ve kterém je uloženo zkoušené ložisko. Otvory pro vlnovod ke snímání signálu AE a speciální snímač vibrací (s vlnovodem) jsou zobrazeny na obr. 4.4 a obr. 4.5. Tvar vlnovodu byl navržen hyperbolický, přičemž se vycházelo ze studie publikované v článku *Vliv délky a tvaru vlnovodů na snímání akustického signálu* (ČERNÝ M., MAZAL P. a FILÍPEK P.) [43], kde autoři porovnávali kvalitu hitů AE v závislosti na tvaru a délce vlnovodů. Vlnovod je upevněn (našroubován) v pouzdru a dotýká se přímo zkoušeného ložiska. Tvar a velikost vlnovodu vibrací byl navržen stejný jako u základního monitorování vibrací kontrolním panelem. Do čela speciálního snímače vibrací (u ložiska) byla umístěna teplotní sonda PT 100 pro digitální zaznamenání teploty v průběhu zkoušení. Otvory pro snímání z ložiska byly navrženy s takovými průměry, aby nedocházelo k ovlivnění vlnovodů vibracemi na tělese stanice.

Snímání signálu AE je prováděno jak z povrchu zkoušeného ložiska skrze vlnovod, tak i z povrchu stanice. Na povrchu jsou využity magnetické snímače nebo snímače MIDI přilepené kyano-akrylátovým lepidlem (obr. 4.4). Jednotka pro měření

vibrací pořízena z grantu FRVŠ umožňuje připojit dva snímače, proto je zde využit jeden speciální snímač s vlnovodem a druhý standardní snímač (obr. 4.6), který je na tělese stanice přichycen pomocí magnetického držáku.



Obr. 4.5 Úprava pouzdra pro zkoušené ložisko [42].

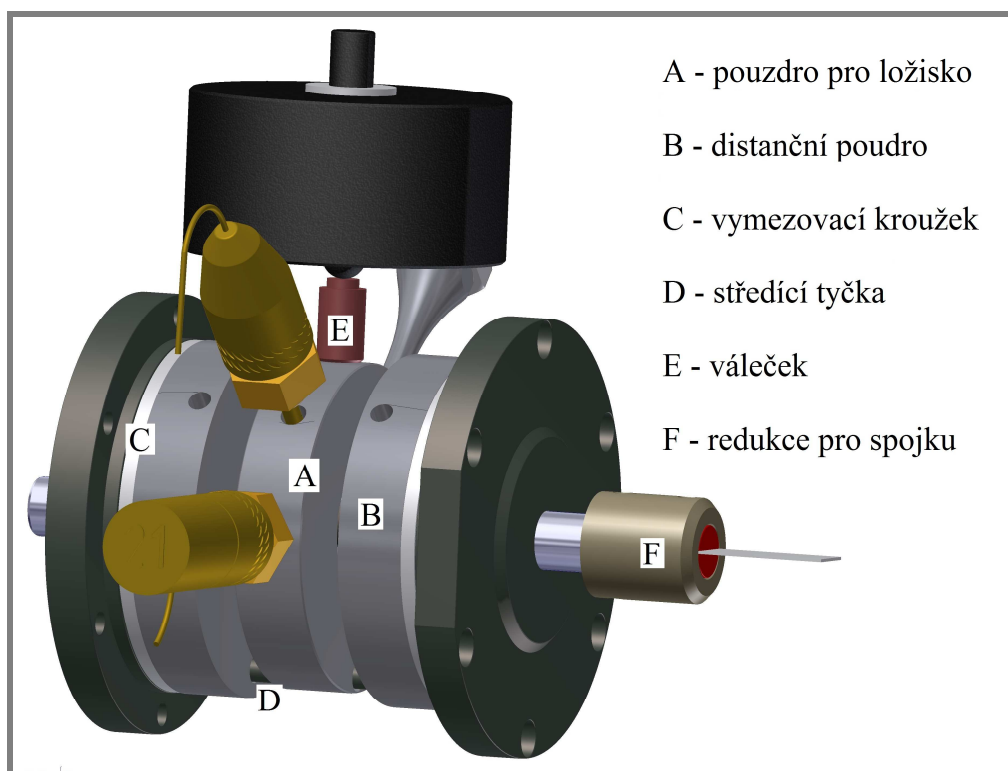


Obr. 4.6 Speciální snímač vibrací a teploty (vlevo) a standardní snímač vibrací a teploty (vpravo).

Zatížení na ložisko je vyvozováno hydraulickým válcem, zatěžující síla přechází přes váleček a pouzdro, v němž je ložisko umístěno (obr. 4.7). Další dvě ložiska umístěná v distančních pouzdrech slouží jako opěrné body a vymezují vůli vůči tělesu stanice. Mezi víkem tělesa a distančními pouzdry jsou umístěny vymezovací kroužky, tímto jsou všechny vůle odebrány a jednotná poloha všech komponent uvnitř tělesa je fixována středící tyčkou (obr. 4.7).

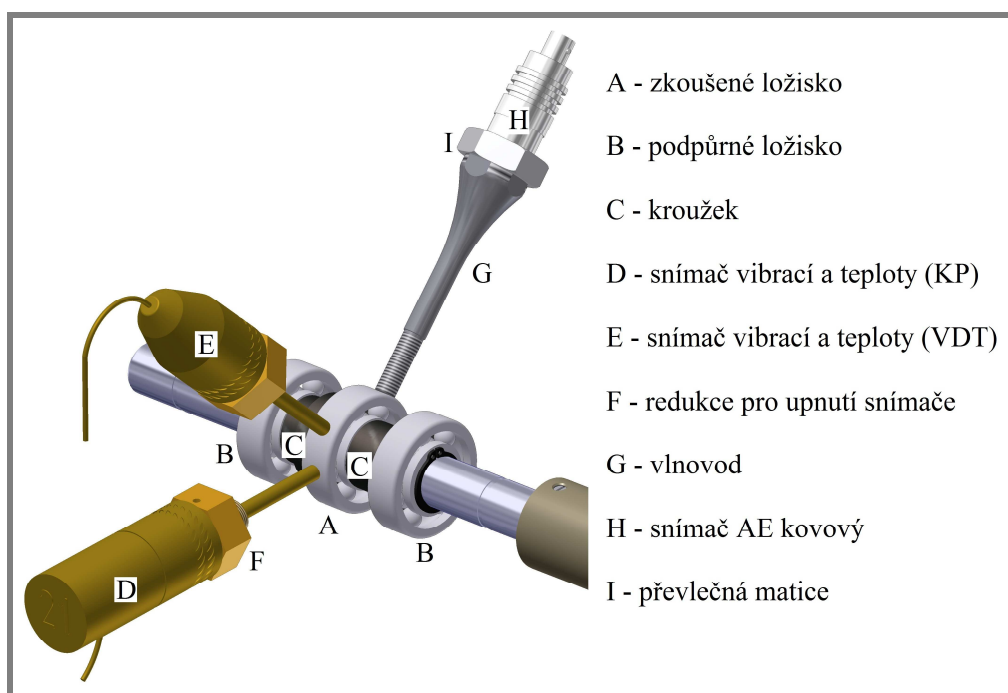
Snímač od kontrolního panelu a speciální snímač vibrací jsou k domku připojeny redukcí. Vlnovody obou snímačů vibrací jsou uchyceny v pružném uložení (stále

dotlačovány k ložiskovému kroužku). Mezi dotykové plochy snímačů a ložisko je nanášeno vazebné prostředí pro snížení ztrát signálu způsobené tímto přechodem.



Obr. 4.7 Model stanice SA67 – detail.

Obrázek 4.8 zobrazuje klíčový uzel stanice i s jeho popisem, poloha ložisek je stanovena tvarem hřídele (osazení) a kroužky umístěnými mezi ložisky.



Obr. 4.8 Model stanice SA67 - detail klíčového uzlu.

5 VÝSLEDKY DIZERTAČNÍ PRÁCE

Pro vyhodnocování experimentálních zkoušek byly použity analyzátory: AE XEDO 4kanál (firma ZD Rpety) a analyzátor vibrací VibroControl 1500 2 kanál (Brüel & Kjær). Karta analyzátoru XEDO obsahuje 10. bitový A/D převodník se vstupním rozsahem po zesílení $\pm 2400 \text{ mV}$. Signál je zaznamenáván pomocí parametrů AE (Counts, RMS, Events), které jsou digitálně zpracovány v hradlovém poli. Současně je výstup z A/D převodníku přiveden na vstup signálového procesoru, kde je možné vzorkovat signál AE s frekvencemi 1, 2, 4 nebo 8 MHz. Frekvenční rozsah aparatury je vymezen od 100 kHz do 800 kHz. Konkrétní použité snímače budou uvedeny v následujících výsledcích experimentálních zkoušek.

Pro zaznamenávání signálu AE byl použit software *Daemon*, pro vyhodnocování časových průběhů signálu software *Daeshow* a pokročilé analýzy zejména ve frekvenční oblasti byly prováděny v prostředí *Matlab*. Software pro záznam a vyhodnocení vibrací byl použit *VDTControlcenter* (firma ViDiTech s.r.o.).

5.1

5.1 Standardní zkoušky životnosti radiálních ložisek - experiment I

Pro sledování a vyhodnocování standardních zkoušek životnosti radiálních ložisek je základní požadavek kladen na dostatek času. Životnost daná výrobcem vychází z velikosti zatížení, provozních otáček, mazání a dalších ovlivňujících faktorů. Ložiska s označením 6204 mají pro experimentální zkoušení na stanicích SA67 následující parametry: maximální dynamické zatížení 13,5 kN a limitní otáčky $20\,000 \text{ min}^{-1}$.

Vstupními parametry pro experiment I byly: ložisko 6204 (nezakrytované), namazané plastickým mazivem *FUCHS RENOLIT DURAPLEX EP2*, počáteční zatížení bylo stanoveno na 3 kN a konstantní otáčky motoru byly 2845 min^{-1} . Doba trvanlivosti z těchto vstupních parametrů byla vypočtena (5.1) cca na 777 hodin. Jedná se o pravděpodobnostní hodnotu 10 % poruchy a o ideální trvanlivost (ve výpočtu nejsou zahrnuty součinitele havárie, mazání ani provozu). V přepočtu na minuty ve kterých je zkouška sledována se jedná o 46 620 minut.

$$L_h = \left(\frac{C}{F} \right)^m \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{13500 \text{ N}}{3000 \text{ N}} \right)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 2845 \text{ min}^{-1}} \doteq 777 \text{ hodin} \quad (5.1)$$

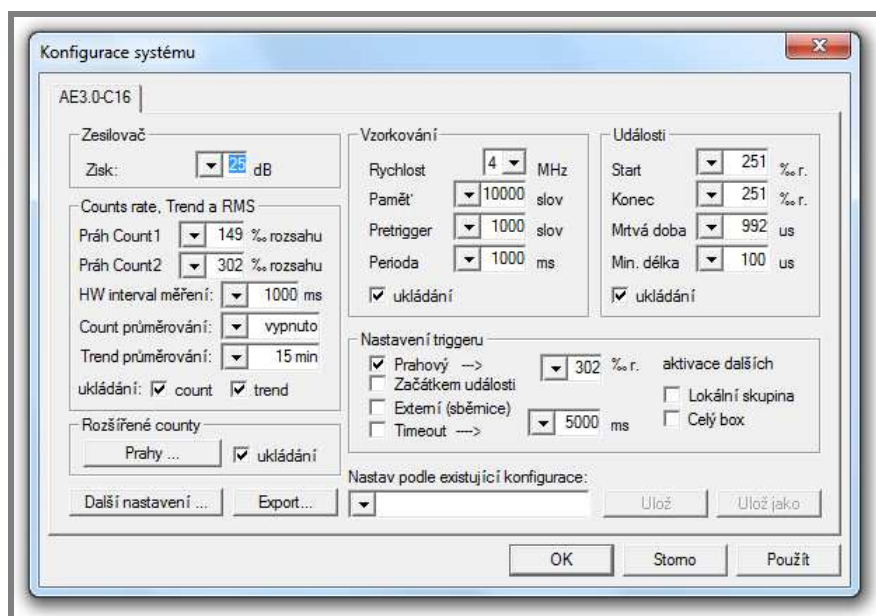
5.1.1

5.1.1 Nastavení měřicího řetězce AE

V experimentu I byly v průběhu zkoušení použity dva kanály analyzátoru AE XEDO. K prvnímu kanálu (dále jen slot 1) byl připojen snímač AE MTPA-15 N. 244-P12 s interním předzesilovačem. Mezi snímač a vlnovod bylo aplikováno speciální vazebné prostředí, rovněž bylo aplikováno i mezi stykovou plochu vlnovodu a zkoušeného ložiska. Ke slotu 2 byl připojen snímač typu MIDI s předzesilovačem o zesílení 35 dB.

Nastavení slotu 1 je zobrazeno na obr. 5.1, kde zásadním vstupním parametrem je zesílení (Zisk) v jednotkách dB. Pod nastavením celkového zesílení následují prahy *Count 1* a *Count 2* s intervalem měření a průměrování trendů. Rozšířené prahy (Counts 16) jsou uvedeny samostatně s odstupňováním od 50 % do 800 % z rozsahu po kroku 50 %. Vzorkování bylo nastaveno na 4 MHz, přičemž spuštění vzorkování bylo stanoveno na prahovou hodnotu 302 %. Parametry hitů událostí AE (délka,

maximální amplituda a doba náběhu) jsou zaznamenávány po nastavení prahů *Start*, *Konec*, *Mrtvá doba* a *Minimální délka*.



Obr. 5.1 Nastavení AE – slot 1.

5.1.2 Analýza výsledků měření v časové oblasti

5.1.2

Graf na obr. 5.2 zobrazuje záznam počtu překmitů AE signálu (dále jen Counts) slotu 1, kde snímač byl umístěn na vlnovodu. Záznam obsahuje základní popis označení zkoušeného vzorku, zatížení, umístění a datum spuštění zkoušky. Osa x reprezentuje čas zkoušky, na levé ose y je intenzita AE v logaritmickém měřítku a je zde zobrazeno všech 16 energetických hladin (Counts). Na pravé ose y je lineární měřítko pro sumační *Hity* (Events). Graf obsahuje dva výpadky (v průběhu 1. dne a kolem 8. dne zkoušky) což je způsobeno nepředvídatelnými okolnostmi, kdy zradila (moderní) počítačová technika.

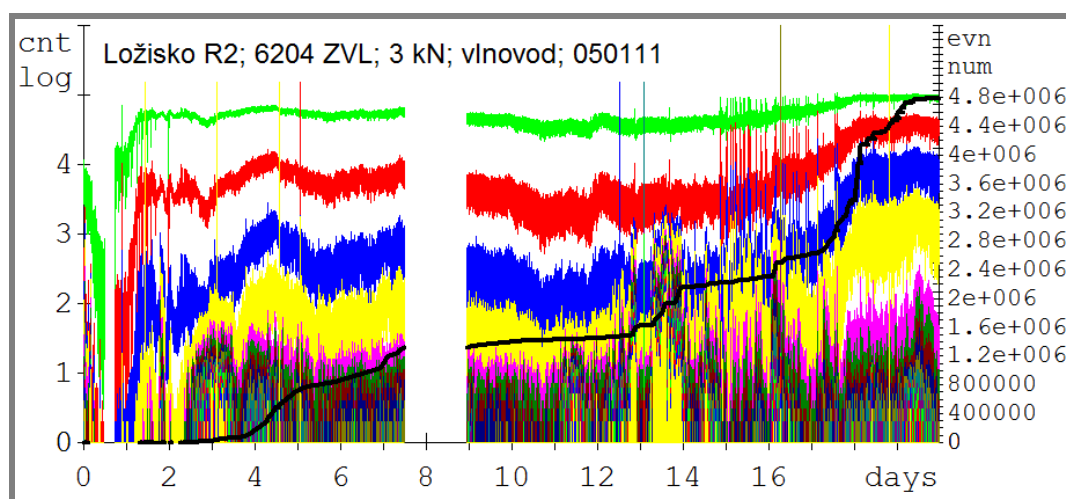
Záznam obsahuje prvních 20 dní dlouhodobé zkoušky, ve kterých dochází k razantním změnám v signálu, některé změny jsou způsobeny změnami vstupních parametrů, konkrétně po prvním výpadku bylo na slotu 1 přidáno celkové zesílení z původních 25 dB na 30 dB. Další změna nastala 12. den, kdy bylo zvýšeno zatížení z 3 kN na 3,7 kN, to stejné se opakovalo o tři dny později (15. den z 3,7 kN na konečných 4,2 kN).

V počáteční fázi měření je znatelný poměrně dramatický nárůst signálu (1. den zkoušky), způsobený uhlazováním stopy z výrobně technologických procesů. Ve druhé fázi záběhu (od 1. dne do 4. dne) jsou pozorovány poměrně frekventované nárůsty a poklesy signálu, což je připisováno utváření stopy se vznikem plastických deformací. Tato perioda se postupně prodlužuje až do ustáleného stavu, kdy signál vykazuje minimální výkyvy z ustálených hodnot.

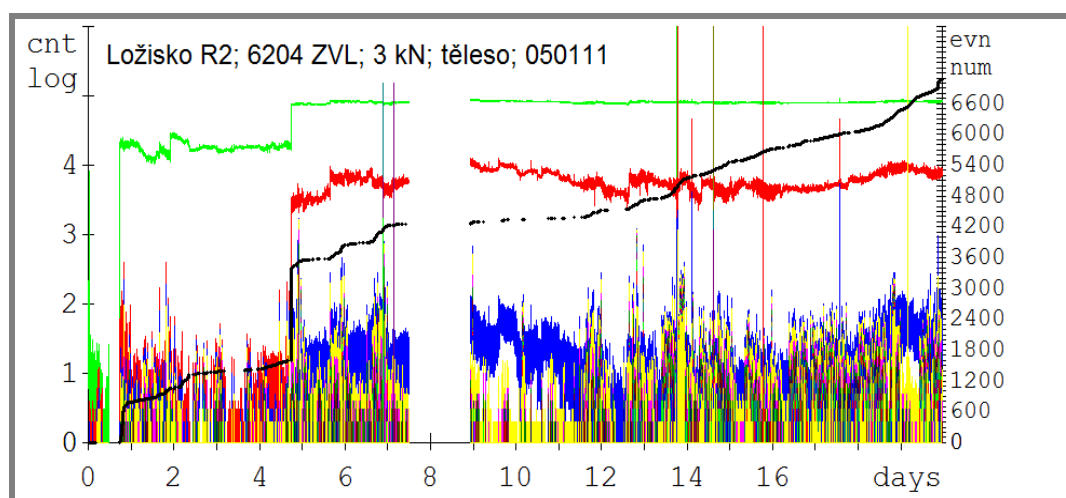
Při změně zatížení (v tomto případě jeho zvýšení) dochází k okamžitému utlumení signálu, což je připisováno zmenšení vůlí a zvýšení celkové tuhosti soustavy. Tento pokles je však pouze krátkodobý a v rozmezí několika dalších hodin je signál posunut zpět do původního trendu s pozdějším, ještě strmějším charakterem.

Základním problémem při snímání ložisek, zejména u experimentálních zkoušek, je nastavení citlivosti měřicí soustavy. Během záběhu ložiska se intenzita signálu poměrně výrazně posouvá, a je nutné nalézt takové nastavení, které pokrývá co nejširší oblast signálu. Tímto je docíleno ochrany proti přílišnému útlumu, nebo naopak přetečení mimo možný rozsah.

Součtový záznam hitů událostí AE (počet) dokládá změny signálu v oblastech se zvýšenou aktivitou. Zde je třeba brát v potaz nastavení prahů detekce vzhledem k celkovému zesílení, nicméně je výhodnější nastavit nižší prahy s dostatečně velkou *Mrtvou dobou*. Při volbě triggeru *Začátkem události* jsou automaticky události spárovány se vzorky, což vede k názornějšímu vyhodnocování (události vs. vzorky).



Obr. 5.2 Záznam počtu překmitů (Counts) a sumačních událostí AE (Events) – slot 1.

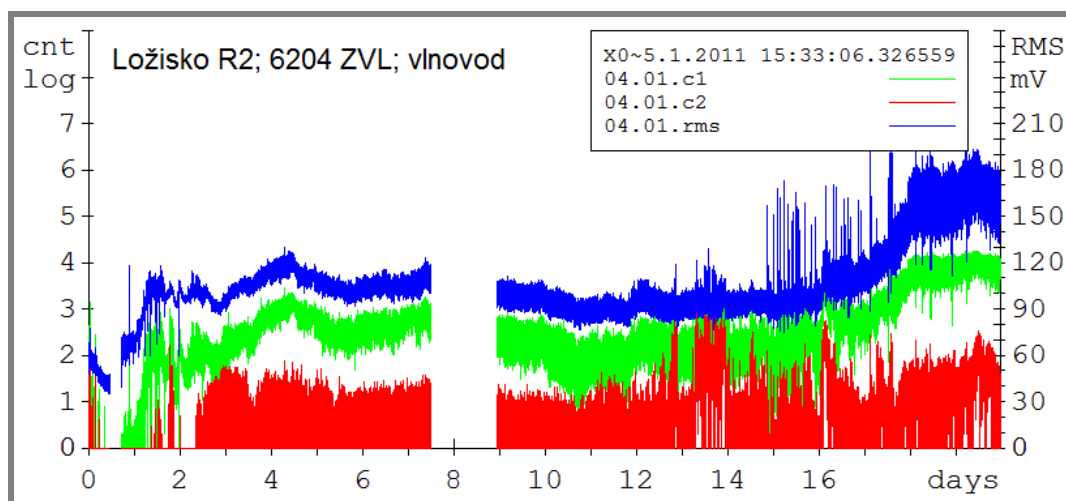


Obr. 5.3 Záznam počtu překmitů (Counts) a sumačních událostí AE (Events) – slot 2.

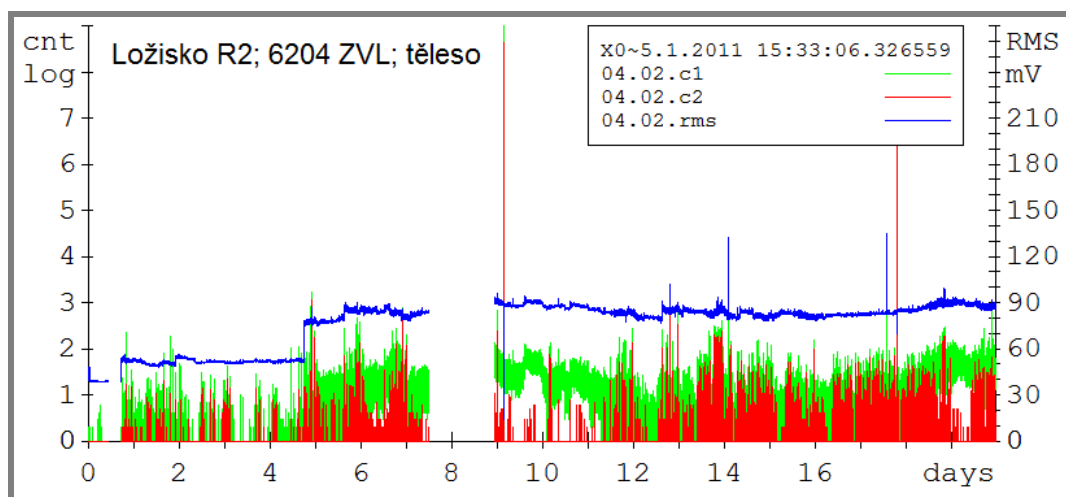
Záznam na obr. 5.3 je z téhož měření, přičemž v tomto případě byl snímač AE (MIDI) umístěn na tělese stanice vedle vlnovodu za použití kyano-akrylátového lepidla. Ke snímači MIDI byl zapojen předzesilovač a nastavení snímání bylo až na zesílení stejné jako v případě snímače umístěného na vlnovodu. Ačkoliv je záznam obsahující rovněž 16 hladin méně výrazný v intenzitě, celkový trend je podobný jako u vlnovodu. Jedinou výraznou změnou vůči záznamu z vlnovodu je skokové zvýšení

celkového zesílení ze 40 dB na 45 dB před pátou hodinou v průběhu zkoušky. Události mají podobný trend jako u vlnovodu, avšak objevují se prázdná místa, zejména při poklesu intenzity, kde volba prahů nebyla dostatečná.

Záznamy *Counts* jsou užitečné zejména kvůli pokrytí velkého úseku měřeného pole, přičemž je možné zobrazit pouze ty hladiny, které vykazují největší změny v průběhu měření. Dalším z parametrů, který lze v časové oblasti vyhodnocovat aparaturou Dakel je *RMS*, doplněný *Count 1* a *Count 2*, viz obr. 5.4 a obr. 5.5. Parametr *RMS* umožňuje získat informaci o energetické hodnotě signálu a je nejčastěji popisován v odborných člancích většiny vědeckých pracovníků. Parametr *RMS* poskytuje poměrně stabilní informace z širokého energetického pásma. Porovnáním záznamů z obr. 5.4 a obr. 5.5 obdržíme první informace o průběhu a síle signálu AE, ačkoli je signál z tělesa více utlumen, vykazuje podobný trend jako signál z vlnovodu. Ve srovnání záznamů z obr. 5.3 a obr. 5.5 se 16. hladinové *County* jeví jako citlivější (což je dáno rozložením detekce prahů do většího rozsahu).



Obr. 5.4 Záznam Count1, Count2 a RMS – slot 1 z 050111.



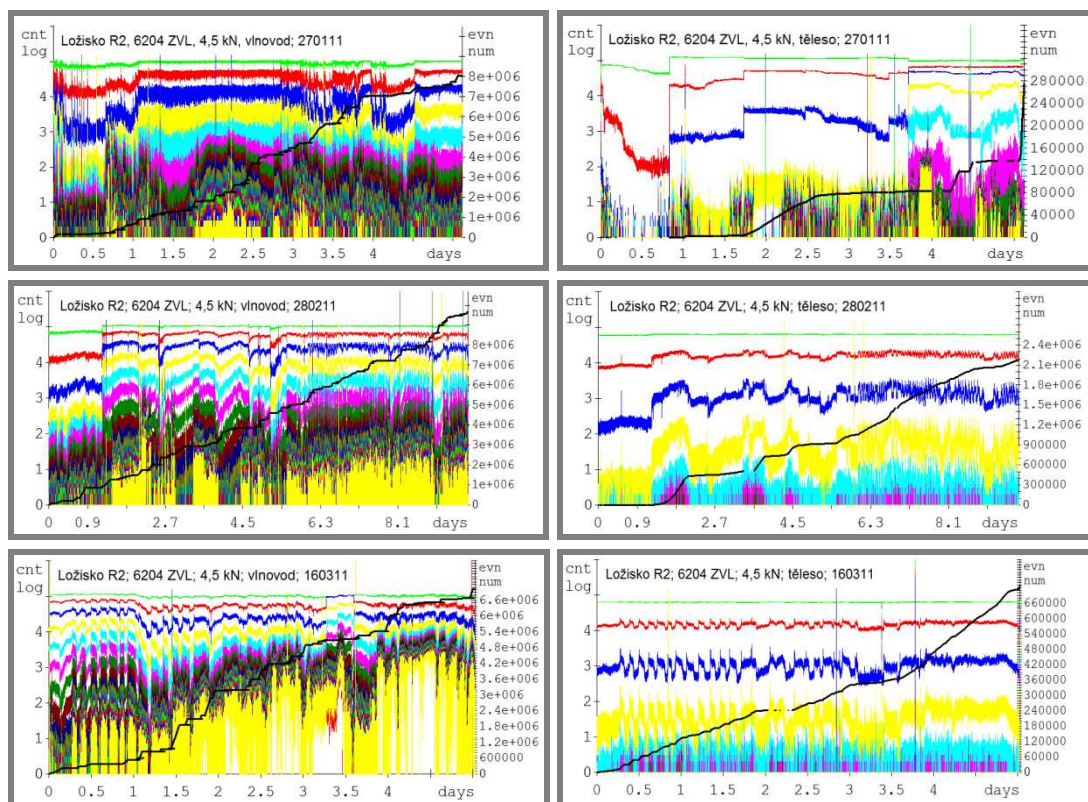
Obr. 5.5 Záznam Count1, Count2 a RMS – slot 2 z 050111.

Převážná část celého záznamu dlouhodobé experimentální zkoušky I je zobrazena v grafech na obr. 5.6. Jednotlivé etapy jsou rozděleny do řádků, přičemž vlevo je

vždy záznam z vlnovodu a vpravo je záznam z tělesa stanice. Úsek od 27. 1. 2011 je pokračováním výše uvedeného záznamu, kde pokračovaly dynamické změny nastartované u konce záznamu (obr. 5.2 a obr. 5.3). V případě snímání z tělesa došlo k jedné změně nastavení citlivosti, ke zvýšení po cca 20 hodinách od začátku této etapy měření. Ostatní výkyvy vyskytující se v záznamu jsou způsobeny signálem generovaným ložiskem (potažmo celou stanicí).

Třetí etapa měření byla po delší odmlce spuštěna 28. 2. 2011. Po počátečním náběhu ložiska (cca 1,2 dne), se začaly objevovat úseky se skokovými změnami signálu s postupnými posuny zpět do předešlých hodnot. Tyto cykly by mohly být prezentovány jako odezva na dynamické děje vznikající únavovými jevy na povrchu valivých ploch, což je možné přímo spojovat s degradací, nebo kontaminací mazacího média. Tyto cykly jsou jasně čitelné jak z vlnovodu, tak i z povrchu stanice. Četnost hitů událostí dokresluje součtová křivka, která však není příliš citlivá na přítomnost těchto cyklů.

Poslední etapa měření spuštěná od 16. 3. 2011 zahrnuje dynamické cykly v signálu již mnohem častěji (vyskytují se několikrát za den). Postupně se jejich četnost zvyšuje ruku v ruce s nárůstem signálu až do zahlcení (nárůst signálu mimo detekovatelný rozsah). V tomto momentě byla stanice zastavena v důsledku zvýšených hodnot vibrací. Analogické chování je možné pozorovat i v případě snímače umístěného na povrchu stanice, pouze ne s tak výrazným globálním nárůstem signálu. Celková doba zkoušky trvala cca 49 dní a výsledným poškozením byla kontaminace a degradace plastického maziva.



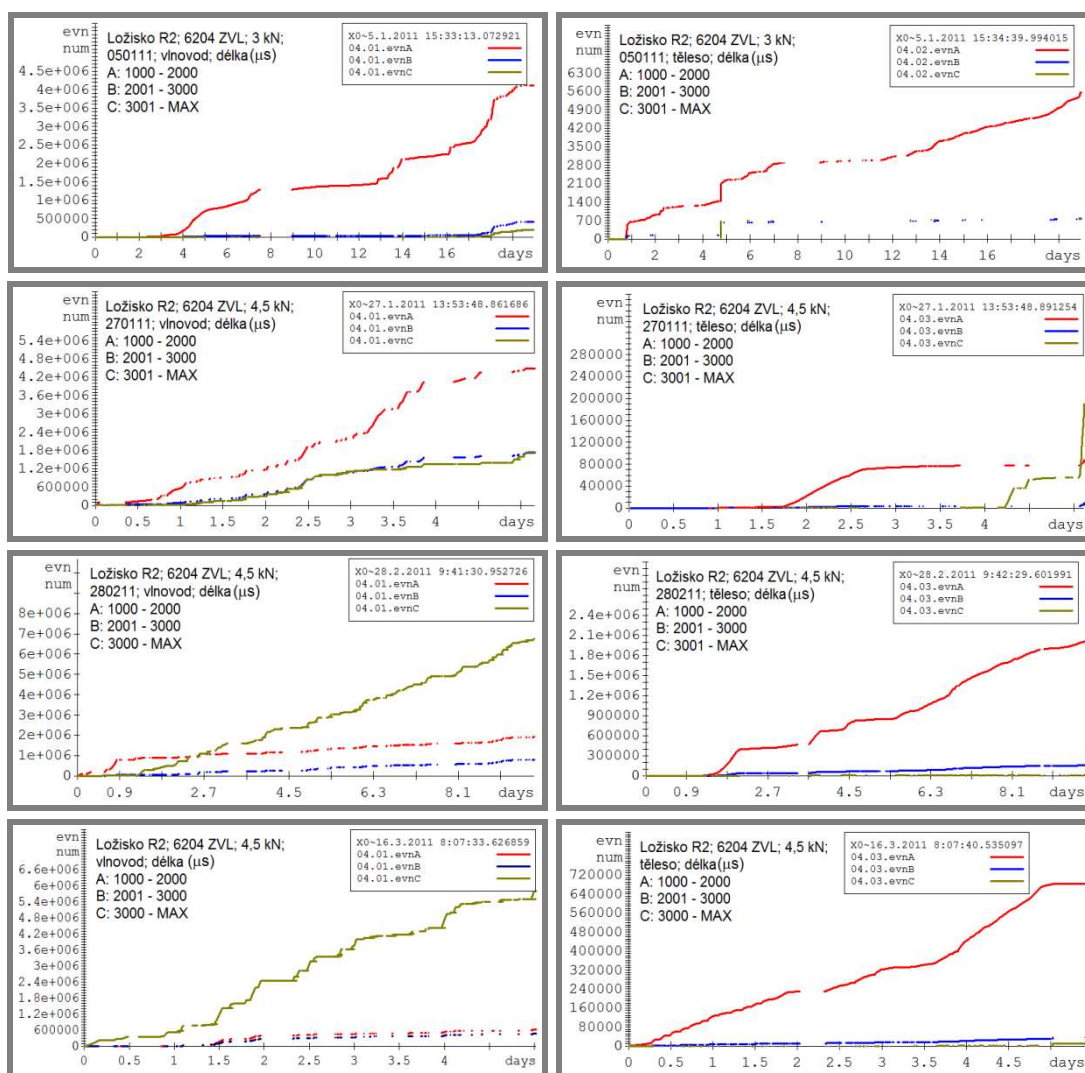
Obr. 5.6 Přehled záznamů *Counts* a sumačních *Events* – Ložisko R2.

Přítomnost těchto cyklů a jejich zvyšující se četnost dokazuje přítomnost nepříznivých dějů spojených s chodem ložiska. Pokud se jedná o monitorování

ložiska na stroji v provozních podmínkách, může být tento jev výhodně využit pro identifikaci vznikající poruchy. Díky tomu může obsluha zařízení získat více času pro detailnější analýzu sledovaného ložiska, případně upravit mazání, či zahájit přípravy na odstávku.

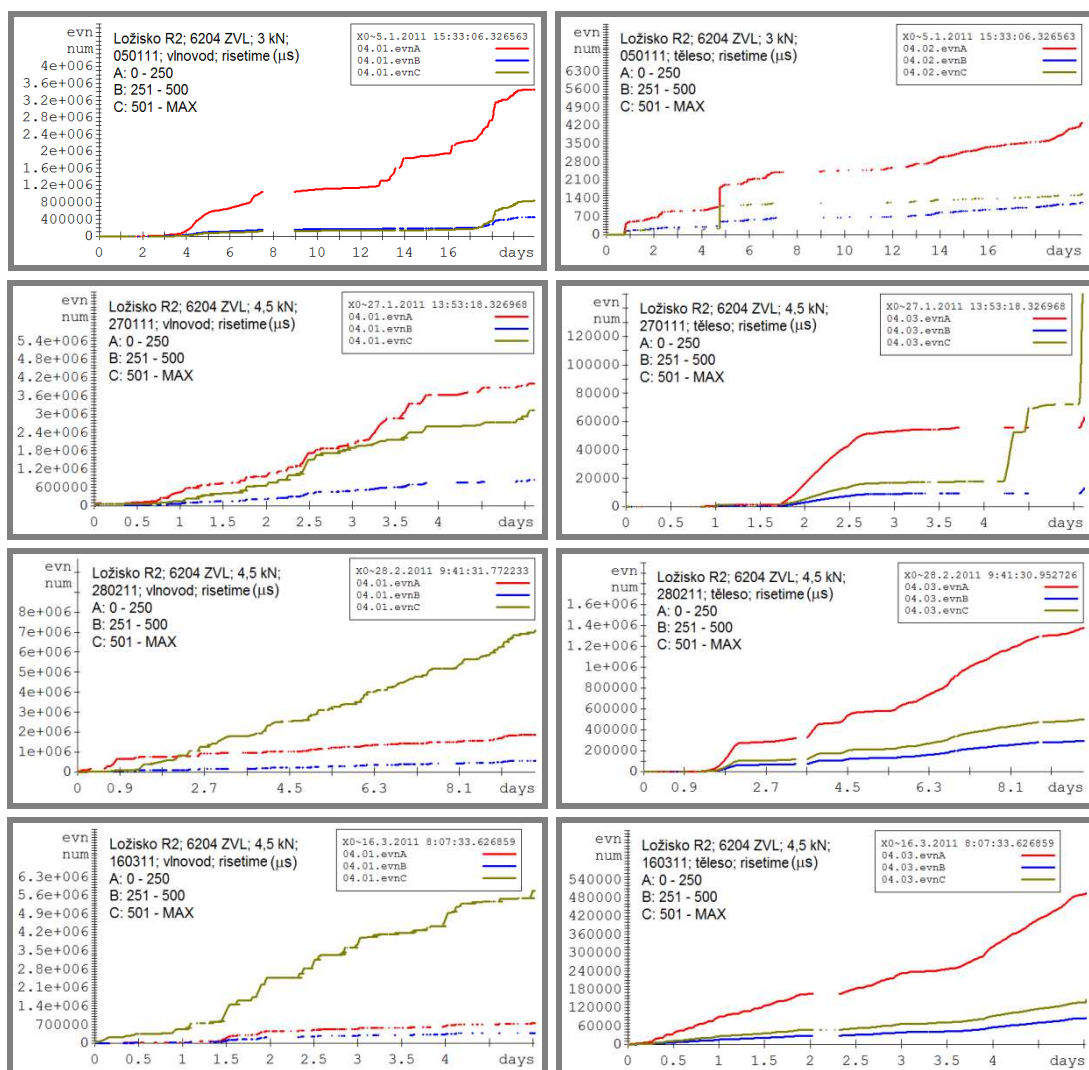
Ke zjištění aktuálního stavu strojního uzlu (ložiska) můžeme přispět také detailním rozborem vlastností hitů událostí AE (Events). Záznamy na obr. 5.7 představují sumační křivky délek hitů rozdělených do tří kategorií (A, B a C) podle zvoleného úseku o dané velikosti. Tyto úseky byly zvoleny s ohledem na pokrytí celého průběhu intenzity a vycházely ze zkušeností z již uskutečněných experimentálních zkoušek. Z analýzy délek je patrný značný rozdíl mezi snímáním z vlnovodu a z povrchu stanice. Zatímco u vlnovodu jsou v průběhu zkoušky detekované stále delší hity, na tělese stanice roste počet zejména u kratších délek.

Z uvedeného vyplývá, že analýza délek hitů je dobrou charakteristikou projevu postupného zvětšování poškození zejména v případech, kdy máme k ložisku nebo do jeho těsné blízkosti umožněn přístup. V případě větších vzdáleností od zdroje s ovlivněním ostatních funkčních prvků (například podpůrných ložisek) se tato informace ztrácí a roste zejména počet kratších hitů.



Obr. 5.7 Přehled záznamů délky trvání sumačních Events – Ložisko R2.

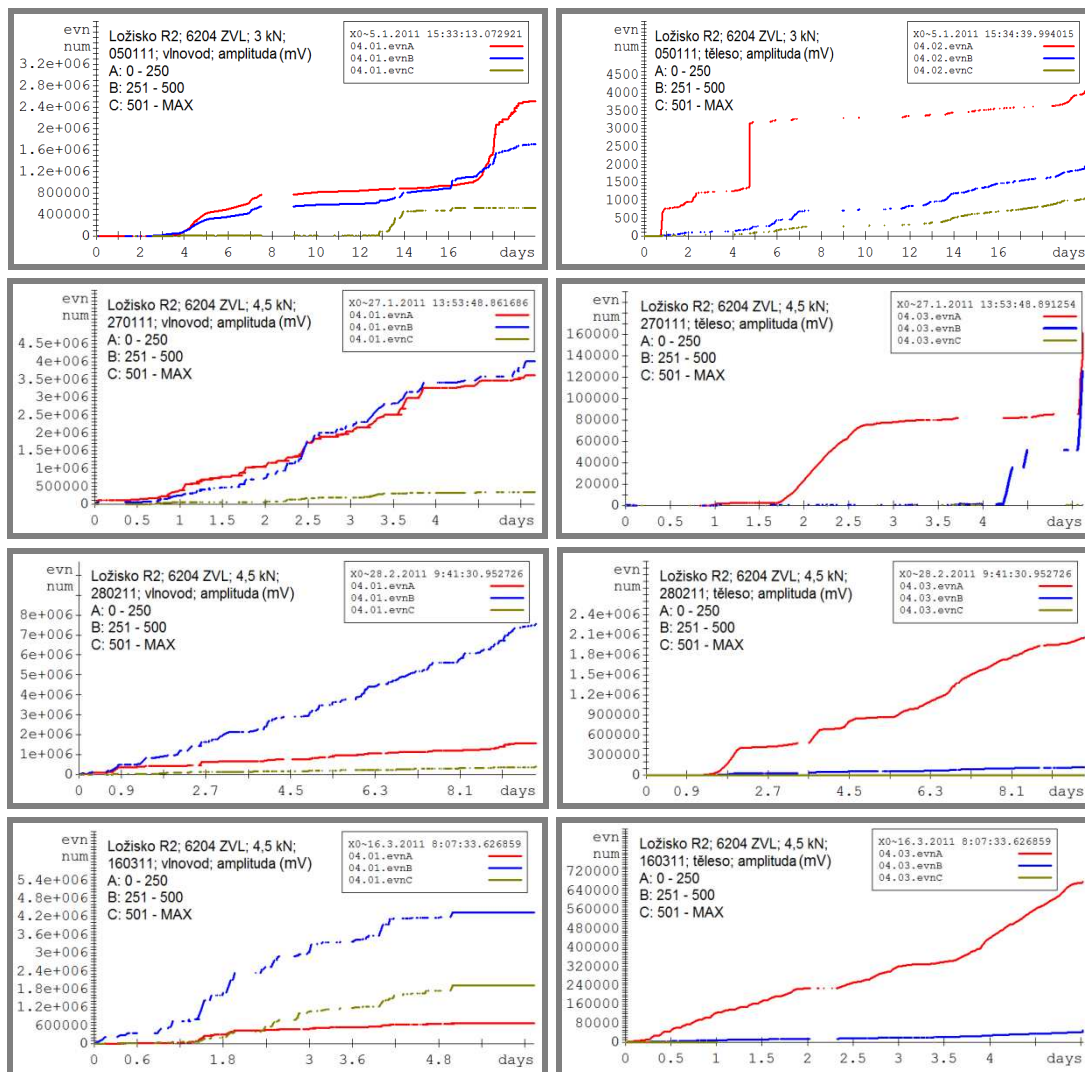
Dalším z parametru hitu který může být analyzován je doba náběhu do maximální amplitudy (risetime). Obrázek 5.8 zobrazuje tyto průběhy stejně jak tomu bylo u délky. Doba náběhu vykazuje analogické chování jako délka hitu zejména při snímání signálu AE z vlnovodu. Při snímání signálu AE z povrchu stanice vykazuje doba náběhu přibližně stejné směrnice křivek pro celý průběh zkoušky a nevykazuje výrazné odezvy na změny v charakteru signálu (myšleno v souvislosti s *Counts*).



Obr. 5.8 Přehled záznamů doby náběhu (risetime) sumačních Events – Ložisko R2.

Posledním základním parametrem hitu události AE je hodnota maximální amplitudy. Stejně jako v předešlých případech je na obr. 5.9 zobrazen průběh pro celou zkoušku. V levé části jsou opět zobrazeny záznamy z vlnovodu a v pravé části z tělesa stanice. Při analýze signálu snímaného z vlnovodu je patrný postupný posun maximálních amplitud do oblasti B, ke konci zkoušky (od 18. 3. 2011) narůstají také amplitudy zahrnuté v oblasti C. Porovnáním záznamů získaných z povrchu stanice je významný nárůst zejména amplitud z oblasti A, přičemž útlum vyšších amplitud je podobně jako u dalších parametrů hitu způsoben ovlivněním dalších částí stanice, po kterých se signál k povrchu šíří. Ačkoli v tomto případě vykazuje amplituda podobnou

závislost při snímání z povrchu stanice jako další parametry hitu (délka a doba náběhu), u experimentálních zkoušek axiálně zatížených vzorků a axiálních ložisek vykazovala právě maximální amplituda nejvýraznější odezvu na projevy poškození. Tyto výsledky byly publikovány na mezinárodních konferencích (PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE – VÝBĚR).



Obr. 5.9 Přehled záznamů *amplitudy* sumačních Events – Ložisko R2.

Z výše uvedených výsledků analýz hitů událostí AE vyplývá značná citlivost měřicí soustavy na polohu snímače od zdroje signálu (ložiska). U komplexnějších stanic jako je například SA67 je signál při cestě k povrchu ovlivněn několika přechody mezi částmi stanice. Těmito přechody a funkčními částmi dochází k razantnímu útlumu tvaru hitů. Výhodné je využití analýzy hitů z povrchů ložiskových domků, vlnovodů, nebo přímých krytů diagnostikovaných strojních částí (ložisek).

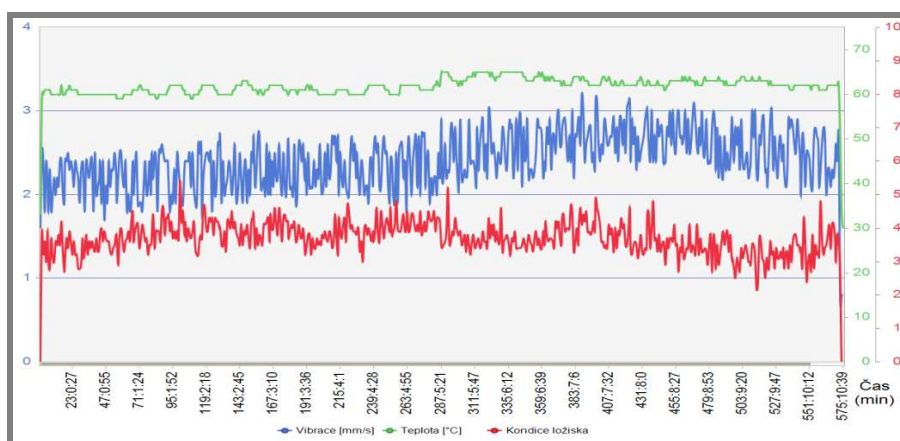
Pro hodnocení stavu ložiska v praktických aplikacích/provozech se nejčastěji využívá monitorování signálu v podobě trendů. Trendy jsou ve většině případů vypočítávány jako průměrné hodnoty z nastavené periody (15 minut, hodina, den...). Tímto způsobem se redukuje velké množství dat, které by jinak bylo velkým problémem při vyhodnocování. Problém může nastat při již zmíněných

energetických výkyvech (cyklech), které jak ukázaly dlouhodobé zkoušky mohou charakterizovat aktuální procesy spojené s poškozováním ložiska. Z dlouhodobého hlediska se tyto výkyvy v trendech nemusí výrazněji projevit a mohou zůstat skryty, až do fáze stabilního růstu intenzity, ve které se poškození začíná projevovat i v oblasti vibrací. Pro odhalení cyklických změn v signálu se jako výhodné jeví využití periodických měření intenzity signálu parametry *Counts*, nebo *RMS*, které by s postupem času zareagovaly na počáteční projevy únavového poškození, či degradace maziva. Spouštěcím mechanismem *hustšího* záznamu by také mohly být odchylky trendů od stabilního průběhu signálu.

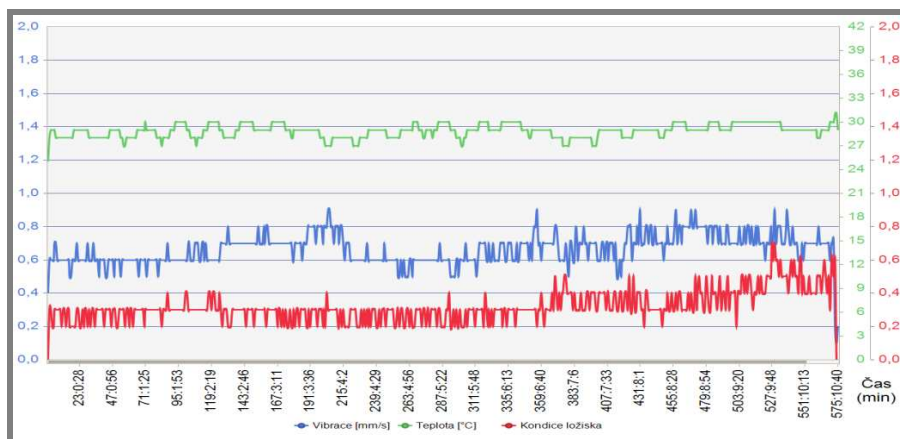
5.1.3

5.1.3 Analýza výsledků měření vibrací a teploty v časové oblasti

V průběhu experimentů bylo do vyhodnocování začleněno i měření vibrací a teploty, jak z povrchu stanice, tak i přímo z povrchu vnějšího kroužku ložiska. Ukázky záznamu jsou na obr. 5.10 a obr. 5.11, tyto průběhy byly nabrány z poslední etapy experimentální zkoušky Ložiska R2. V případě záznamu z vlnovodu je nárůst signálu zvýšen v celé konečné etapě a je doprovázen výkyvy ve vibracích (rychlosti – m.s^{-1}) i v kondici (zrychlení – m.s^{-2}). Výsledné poškození ložiska nebylo klasické únavové poškození povrchu dráhy, ale patrně došlo k degradaci a kontaminaci maziva, proto vibrační hodnoty nevykazují nějaký prudký nárůst. Tomu odpovídá i průběh teploty, která má mírný trend růstu, ale nevykazuje náhlé výkmity, jako důsledek zadírávání a přehřívání ložiska.



Obr. 5.10 Záznam průběhu vibrací a teploty na ložisku z poslední etapy zkoušky – Ložisko R2.



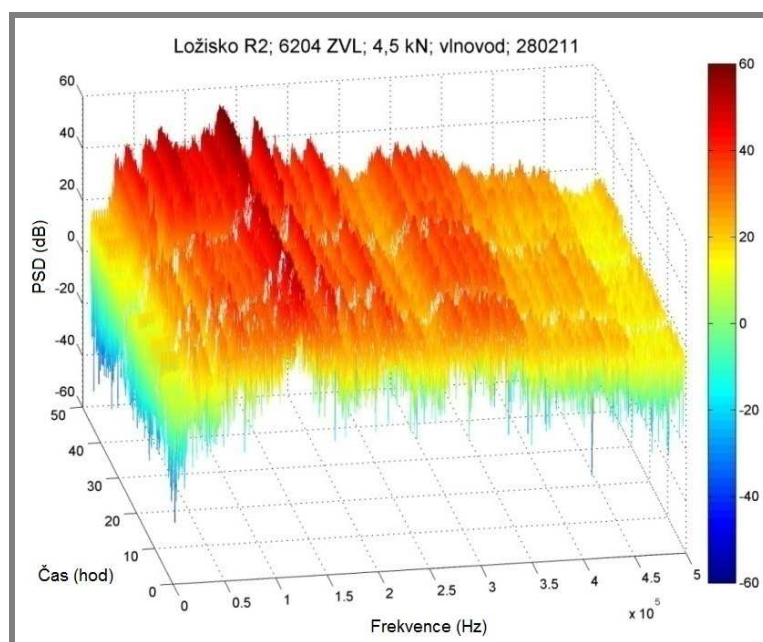
Obr. 5.11 Záznam průběhu vibrací a teploty na tělese z poslední etapy zkoušky – Ložisko R2.

V případě snímače umístěného na povrchu stanice je signál několikanásobně více utlumen a reaguje až v této poslední etapě zkoušky. Snímání teploty z povrchu stanice, kde snímač a povrch odděluje magnetický držák, je příliš ovlivněno prostředím a proto je pokládáno za mírně nadbytečné a nevypovídající.

5.1.4 Analýza výsledků AE ve frekvenční oblasti

5.1.4

Data naměřená během experimentální zkoušky lze vyhodnocovat také ve frekvenční oblasti. K tomuto účelu jsou využívány exporty zaznamenaných vzorků. Na vyhodnocení vzorků má zásadní vliv správné nastavení (viz. obr. 5.1). Vzorkování probíhá v signálovém procesoru, který vzorkuje signál s frekvencí 1, 2, 4 nebo 8 MHz. Velikost vzorku je ovlivněna velikostí paměti, dále je možné zvolit *pretrigger* a *vzorkovací periodu*. Vzorkovací perioda je omezena maximální hodnotou 60 s což je dáno možnostmi analyzátoru. S ohledem na délku měření je nutné zvolit správné parametry nastavení vzorkování. Při krátkodobých zkouškách jako jsou zrychlené experimenty (způsobené zvýšením zatížení, či úběrem mazání) je možné zvolit periodu nižší (1 s, 5 s, 10 s, ...). Při dlouhodobých zkouškách nastává problém s velkým množstvím dat, jedná-li se například o několikaměsíční měření je minimální celkový počet vzorků za jeden měsíc cca 44 000 navzorkovaných hitů událostí AE. Takovéto enormní množství dat v dnešní době je ještě stále problém zpracovat jako celek a je nutné vyseparovat data do menších časových úseků a tyto následně vzájemně porovnávat.

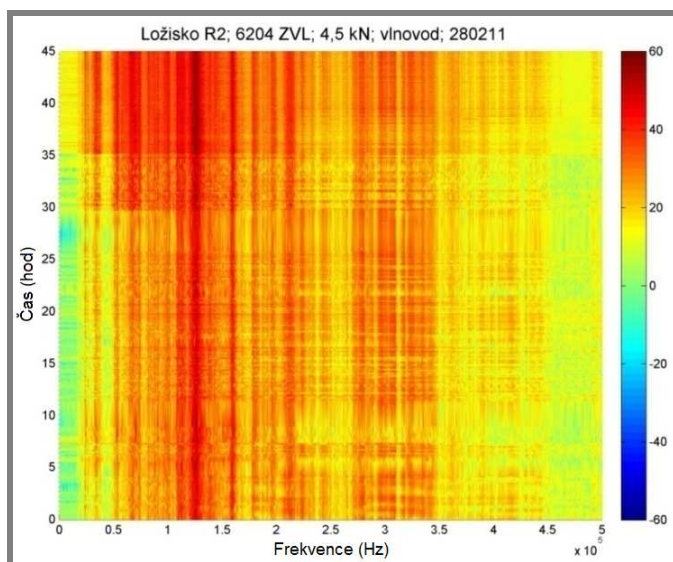


Obr. 5.12 Záznam průběhu frekvenčního spektra z vlnovodu – Ložisko R2.

Na obr. 5.12 je zobrazen průběh frekvenčního spektra ve formě 3D grafu začátku předposlední etapy experimentální zkoušky ložiska R2. Graf obsahuje rozsah frekvence (0 až 500) kHz, celkovou dobu pro zobrazení v příslušných jednotkách a intenzitu signálu (*PSD*) vztaženou k 1 V s jednotkou dB.

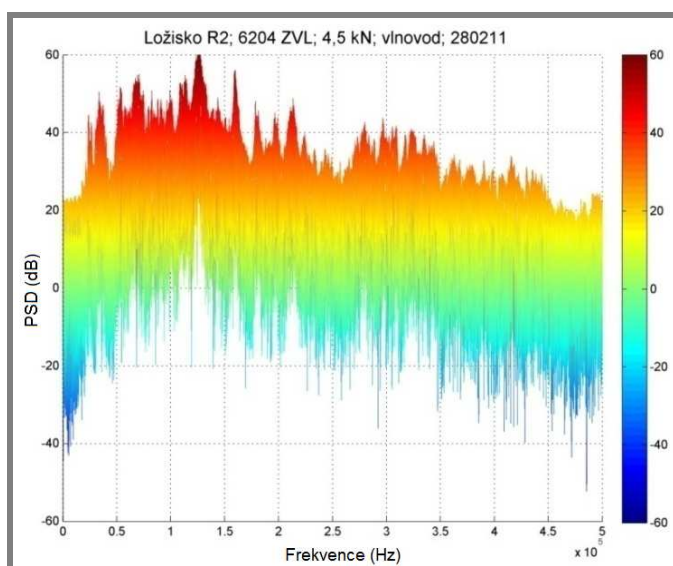
V této etapě zkoušky bylo nastavení periody pro vzorkování nepříliš vhodné zvoleno na 1000 ms, což mělo za následek enormní množství dat. Nastavení detekce hitů je tedy ovlivněno periodou a triggerem, ve kterém se definují energetické prahy

příchozích hitů. Otázka vhodného nastavení je značně komplikovaná a vychází zejména ze zkušeností obsluhy diagnostické aparatury. Obecně je vhodné nastavit nižší prahy pro hity a velkou periodu. Touto volbou je sice zvýšen počet energeticky menších hitů, ale po uplynutí dané periody navzorkuje procesor aktuálně další hit (splňující podmínku triggeru). S rostoucím poškozením pak roste i energie hitů a z rozdílů mezi malými a velkými hity lze poukazovat na rozvoj poškození.



Obr. 5.13 Záznam průběhu spektrogramu z vlnovodu – Ložisko R2.

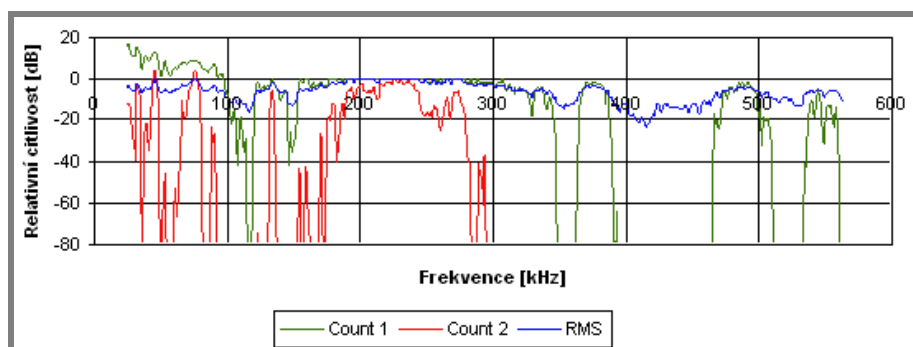
Obrázek 5.13 zobrazuje spektrogram, jedná se o pohled shora na 3D graf, ve kterém je intenzita signálu vyjádřena barevnou škálou. V záznamu je patrné postupné rozšiřování intenzity signálu i do postranních frekvenčních pásem. Od 30. hodiny a zejména od 35. hodiny zkoušky dochází k razantnějšímu rozšíření spektra a tento projev je rovněž patrný také v analýze z časové oblasti (Counts). Spektrogramy jsou velmi dobře uživatelsky čitelné a jsou jedny z nevhodnějších forem prezentace výsledků projevu poškození ve frekvenční oblasti z průběhu zkoušky.



Obr. 5.14 Zobrazení špiček v čelním pohledu na 3D graf (obr. 10.12) – Ložisko R2.

Obrázek 5.14 zobrazuje čelní pohled na měřený úsek a dokresluje špičky, které se v dané etapě měření nejvíce projeví. Současně je také možné provádět řezy 3D grafu a zobrazovat jen určité časové momenty naměřené zkoušky. Dominantní nárůst PSD byl detekovatelný v oblasti 130 kHz, která je charakteristická pro uskutečněné experimenty těchto ložisek.

Frekvenční charakteristika snímače umístěného na vlnovodu je zobrazena na obr. 5.15. Z průběhů RMS a Count 1 je až na výjimky patrný poměrně stabilní průběh v pásmu od (30 do 350) kHz.



Obr. 5.15 Frekvenční charakteristika snímače umístěného na vlnovodu – Ložisko R2.

5.1.5 Výsledné poškození ložiska

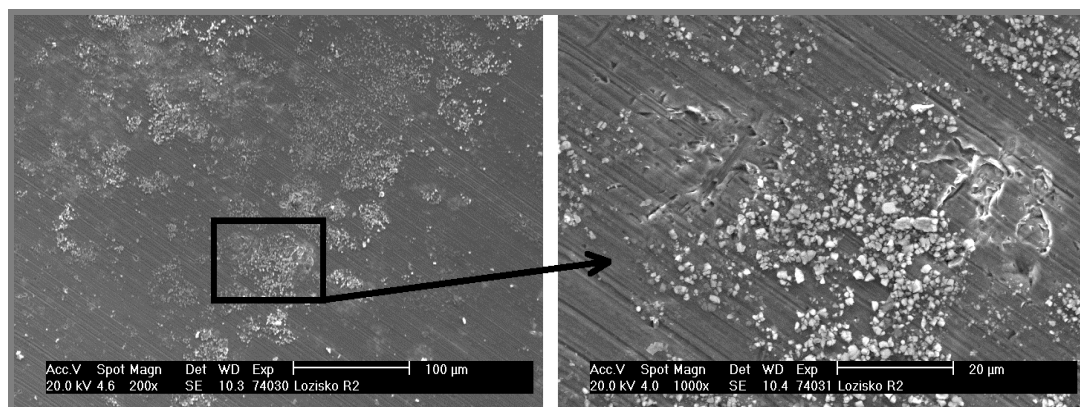
5.1.5

Výsledné poškození ložiska 6204 s pracovním označením R2 je zobrazeno na obr. 5.16. V tomto případě na ložisku nebylo nalezeno výrazné únavové poškození (pitting), nicméně po obvodu vnitřního kroužku se na první pohled vyskytovaly drobné rýhy kolmé na směr valení. Žádné výrazné poškození ani zvýšená teplota nebyly zjištěny na kleci ani kuličkách. Výraznější poškození byla objevena na vnějším kroužku ložiska. Tato poškození byla umístěna s jistou pravidelností, která věrohodně kopírovala rozteč kuliček v kleci. Zhruba na třetině celkového obvodu kroužku byly nalezeny shluky na první pohled vydřených míst, které by mohly být považovány za tzv. *false brinelling*. Při detailní analýze užitím elektronového mikroskopu byly získány snímky povrchu inkriminovaných míst, viz obr. 5.16. Levý snímek zobrazuje poškozenou oblast s udaným měřítkem 100 μm . Snímek v pravé části zobrazuje detail vybraného úseku. V této oblasti se vyskytuje poškození povrchu ve formě velmi malých částic, které se odlupují z povrchu, následuje jejich migrace, zamačkávání a vylupování z dráhy ložiska.

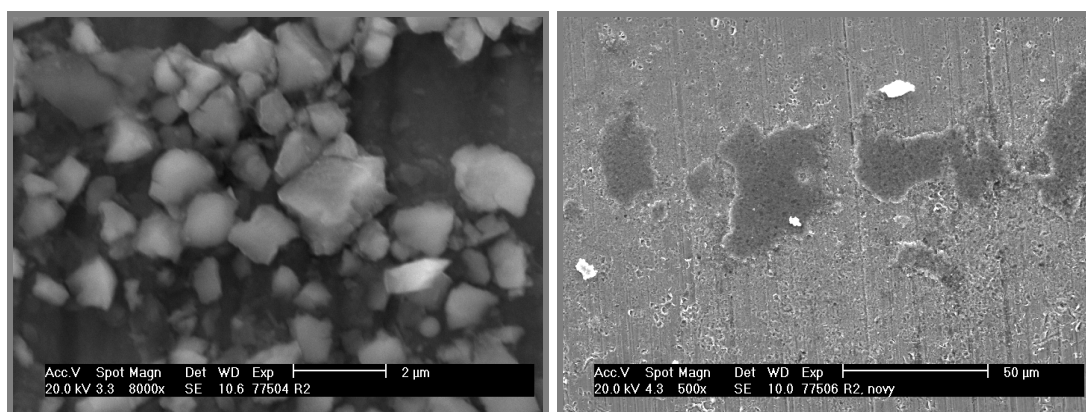
Snímek na obr. 5.17 (vlevo) zachycuje detail této oblasti ve zvětšení 8000x. Po aplikaci bodové analýzy tohoto místa bylo zjištěno chemické složení obsahující kromě standardně zastoupených prvků také: Zn, Al, Si, P a S. Detailní popis včetně přesně zastoupeného chemického složení je na obr. 5.18. Bílé částice na povrchu dráhy patrně nesou zastoupení Al, který zde mohl částečně zůstat po dokončovacích procesech – broušení.

Záhadným faktorem však zůstávalo pravidelné rozmístění těchto poškození po dráze ložiska. Proto bylo přistoupeno k demontování nového ložiska a jeho detailní prohlídce. Ložisko bylo vybráno ze stejného balení a pravděpodobně se tedy jednalo i o stejnou sérii. Na novém ložisku byly objeveny podobné úkazy jako na Ložisku R2, na první pohled se opět jednalo o výskyt příčných rýh rozmístěných po obvodu dráhy ložiska s periodou vzdálenosti kuliček v kleci. Tyto tmavé oblasti zobrazené na

obr. 5.17 (vpravo) byly podrobeny analýze chemického složení (obr. 5.19), která odhalila enormní přítomnost *Si* a částečně zde byl nalezen i *Al*.



Obr. 5.16 Poškození vnějšího kroužku – Ložisko R2.

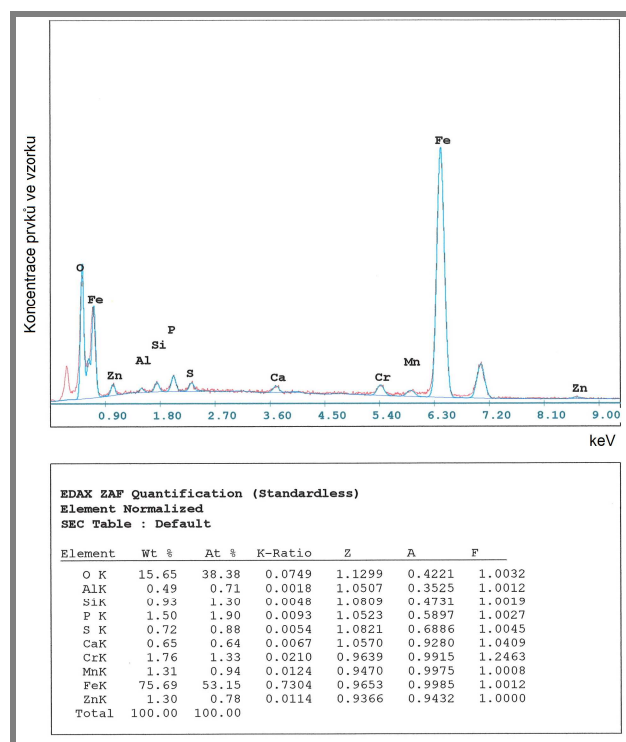


Obr. 5.17 Detail poškození – Ložisko R2 (vlevo) a poškození nového ložiska (vpravo).

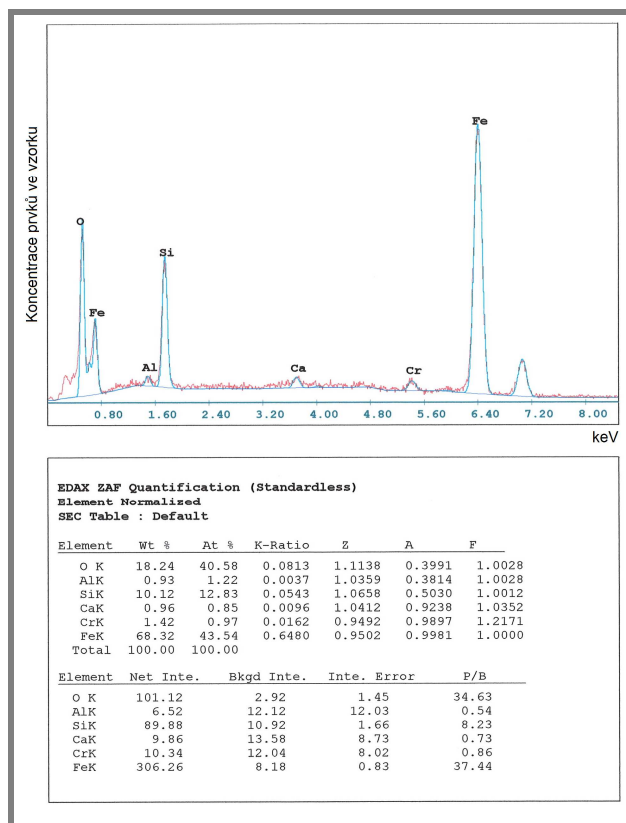
A zde vyvstala otázka, jak se mohl křemík, navíc v tak značném zastoupení, objevit právě v těchto periodicky rozmístěných oblastech, odkud se získal a de-facto co ovlivnil. Přítomnost *Al* by mohla být vysvětlena procesy spojenými s dokončovacími procesy úpravy povrchu ložiska (broušení). U *Si* by mohla být vyslovena hypotéza, zda se nejedná o jakési znečištění, navázání *Si* patrně z prachu na konzervační látku [44], případně přímo na *Al*. Periodicita s jakou se tato místa na ložisku vyskytují nasvědčuje, že právě v těchto místech a současně také v zatížené oblasti ložiska, se po ukončení zkoušky objevily částice obsahující prvky viz. obr. 5.18. Je nutné také připomenout, že ložisko nebylo zakrytováno a obsahovalo konzervační olej. Před zkouškou nebylo vymyto, pouze došlo k jeho domazání plastickým mazivem (mazivo na bázi Lithia - FUCHS RENOLIT DURAPLEX EP2).

Přesné mechanismy vzniku takového poškození zatím nebyly popsány a ani v této práci není cílem bližší materiálová studie degradace maziva, nebo kontaminace okolními látkami. Z uvedených výsledků je však zřejmé, že výsledné poškození ložiska bylo iniciováno právě přítomností počátečního poškození povrchu v místě styku kuliček s drahami kroužků. Počáteční poškození mělo charakter nánosu na povrchu dráhy kroužků v místech periodicky rozmístěných vzhledem k poloze kuliček. Výsledné poškození ložiska vykazovalo známky tvrdých těles a vznik rýh a otisků do povrchu dráhy. V průběhu měření metodou AE byly pozorovány změny

v charakteru signálu, které popisují postupný rozvoj poškození, až do jeho výsledného rozsahu.



Obr. 5.18 Chemické složení bodové analýzy poškozené oblasti - 77504 R2.



Obr. 5.19 Chemické složení bodové analýzy nového ložiska.

5.2

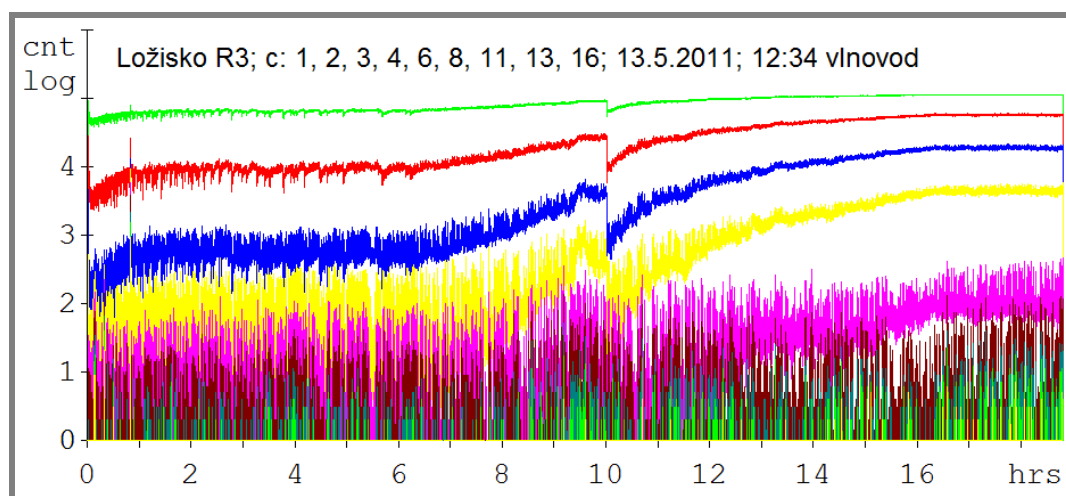
5.2 Zrychlené zkoušky životnosti radiálních ložisek – experiment II

Druhým typem experimentální zkoušky prezentované v této práci je zrychlená zkouška s uměle vytvořeným poškozením. Toto uměle vytvořené poškození nemá za prvotní cíl diagnostikovat definované poškození, čemuž se věnuje převážná část autorů uvedených v rešeršní části této práce. V tomto případě se jedná o defekt vytvořený v povrchové vrstvě dráhy ložiska zasahující do hloubky pouze do několika jednotek μm . Výčnělky takto vytvořeného poškození bývají odstraněny již po několika sekundách, maximálně minutách od startu zkoušky. Prohlubně, které však zůstanou v dráze, mohou působit jako bariéra plynulého přísunu maziva do místa kontaktu. Za nímž po určité době a za předpokladu nepříznivých podmínek může začít docházet k hladovění stykových ploch a tvorbě únavového poškozování, tvorbě mikrotrhlin a jejich růstu.

5.2.1

5.2.1 Analýza výsledků měření v časové oblasti

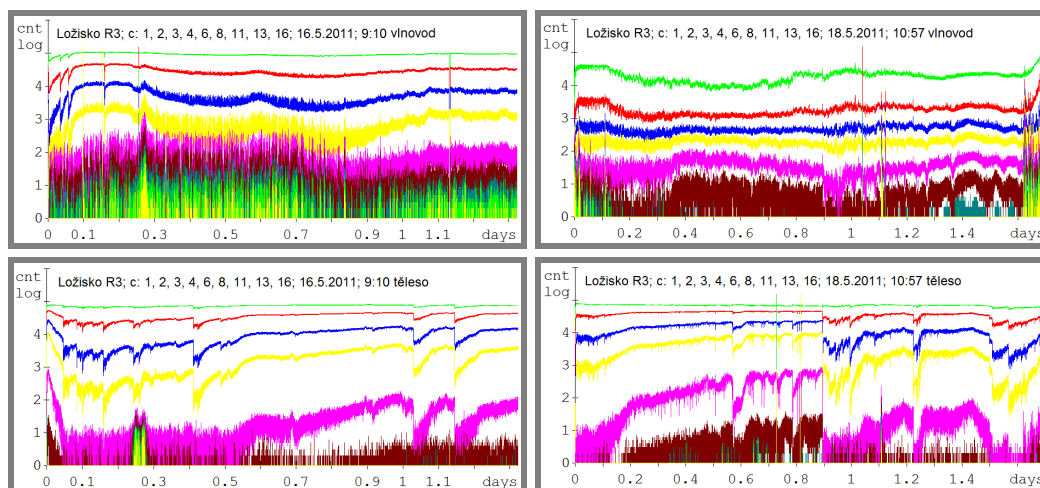
Začátek zkoušky zobrazuje graf na obr. 5.20, po úvodním rychlém poklesu (v řádu několika desítek sekund) dochází k pozvolnému nárůstu signálu až do okamžiku náhlého strmého poklesu. Od tohoto okamžiku se signál dostává zpět do trendu jaký byl nastolen ještě před poklesem. Tento průběh je charakteristický pro záběh nového ložiska a je možné jej pozorovat v naprosté většině případů na zkoušených ložiscích. Po konzultaci s odborníkem na ložiska by tento jev mohl být přisuzován také odstříku, který vzniká při záběhu ložiska, zvláště u zakrytovaných ložisek, doprovázenému skokovými změnami teploty.



Obr. 5.20 Záznam záběhu nového ložiska v podobě překmitů (Counts) – Ložisko R3.

Po 19. hodinách od začátku zkoušky došlo k výpadku stanice, což bylo způsobeno nastavením příliš velké citlivosti vibrací. Zkouška byla obnovena 16. 5. 2011 v 9.10, její průběh je znázorněn na obr. 5.21 vlevo. Po několika energetických poklesech se signál postupně ustálil a tento ustálený průběh trval až do 18. 5. 2011 (graf nezobrazuje celý záznam v tomto mezidobí). Při porovnání signálů z ložiska a povrchu stanice je zřejmé, že hlavní rysy jsou totožné (např. zvýšení intenzity po 0,3. dne). Zde je nutno poznamenat, že signál na stanici je ovlivněn nejen aktuálním stavem zkoušeného ložiska, ale také podpurnými ložisky. Tato ložiska nebyla před zkouškou měněna a s velkou pravděpodobností již mohou rovněž vykazovat známky únavového poškození, které se projevuje ve výsledném signálu.

Průběh signálu v grafu na obr. 5.21 (vpravo) zobrazuje poslední etapu zkoušení, tedy od vytvoření umělého poškození, až po zastavení zkoušky vlivem zvýšených hodnot vibrací, ty jsou sledovány na kontrolním panelu stanice. V záznamu je jasně patrných několik zajímavých úseků. Prvním z nich je jakési uklidnění – útlum signálu trvající od spuštění, až do přibližně 0,2. dne. Od 0,3. dne následuje nárůst hladin s vyššími prahy, dochází tedy k většímu počtu rázů s vyšší intenzitou a dále pokračuje mírný útlum a stagnace. Tato oblast je připisována zvýšenému tření v důsledku hladovění kontaktu v místě kolem umělého poškození. Od 0,9. dne se začínají objevovat energetické výkyvy, které mohou být projevem vzniku únavových trhlin. Od 1,2. dne se výkmity opakují postupně s nižší periodou a opět narůstají vyšší hladiny signálu. Tato etapa může být popsána jako uhlazování ostrých hran v místech povrchových trhlin. Od 1,6. dne dochází ke strmému nárůstu signálu, což ve spojitosti s výsledným poškozením odpovídá vylupování větších zrn materiálu z povrchu dráhy ložiska a patrně dochází i ke kontaminaci maziva odloučenými kovovými částicemi. V případě snímání signálu AE z povrchu stanice se i zde projevil postupný rozvoj poškození v charakteru signálu opakovanými výkyvy (cykly), přičemž tento signál, jak již bylo zmíněno, je zašuměn i podpurnými ložisky.



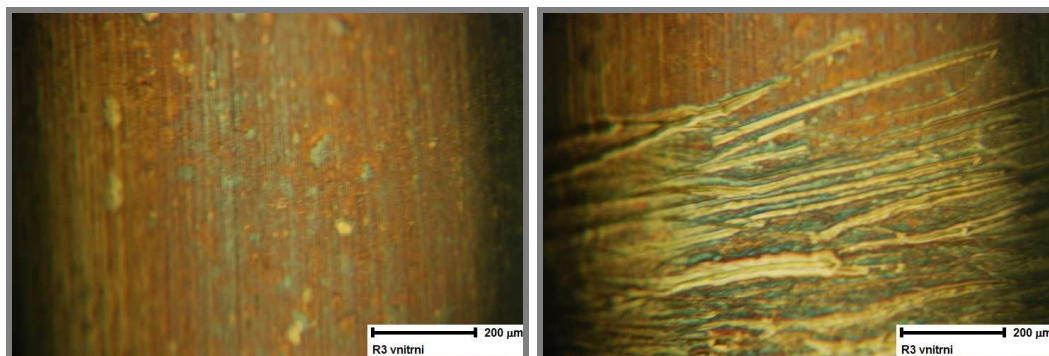
Obr. 5.21 Záznam před poškozením (vlevo) a po uměle vytvořeném poškození (vpravo) – LožiskoR3.

5.2.2 Uměle vytvořené poškození dráhy vnitřního kroužku

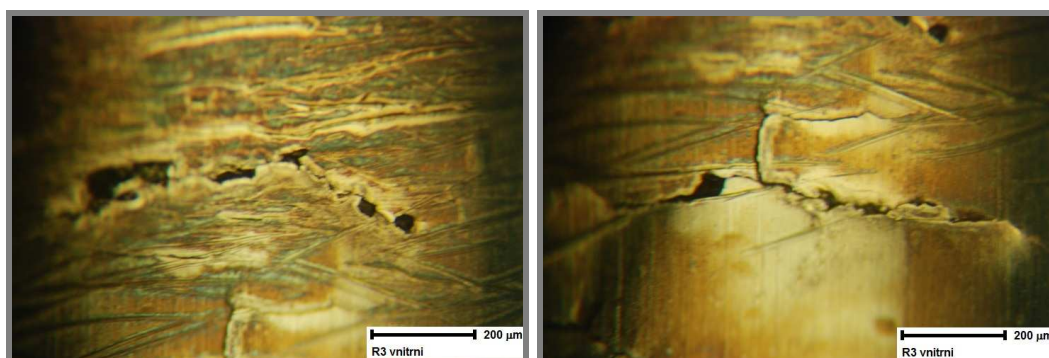
Ložisko R3 bylo 18. 5. 2011 vyjmuta ze stanice a vymyta technickým benzínem. Za pomoci stopkového brusného diamantového tělíska bylo vytvořeno umělé poškození na povrchu dráhy vnitřního kroužku. Velikost a rozsah poškození byl volen s ohledem na vyvarování se úplného a okamžitého zahlázení poškození po spuštění další etapy zkoušky. Povrch vnitřního kroužku po ukončení poslední etapy je zobrazen na obr. 5.22, kde vlevo je snímek dráhy přirozeně opotřeбенé a nejsou na ní nalezeny žádná významná únavová poškození, která by mohla zapříčinit selhání ložiska. Na pravém snímku je zobrazeno uměle vytvořené poškození povrchu, konkrétně se jedná o vrypy vytvořené napříč ke směru valení s uhlazenými výčnělky.

Účelem takto vytvořeného poškození bylo iniciovat počátek přirozeného kontaktního poškození právě do této oblasti a zároveň přirozené poškození časově urychlit. Jak je patrné z následujících snímků, tento předpoklad se jevil jako správný a s přihlédnutím ke směru valení se zejména v pozici za umělým poškozením, ale částečně již v něm, začaly tvořit únavové trhliny a docházelo i k vylupování části

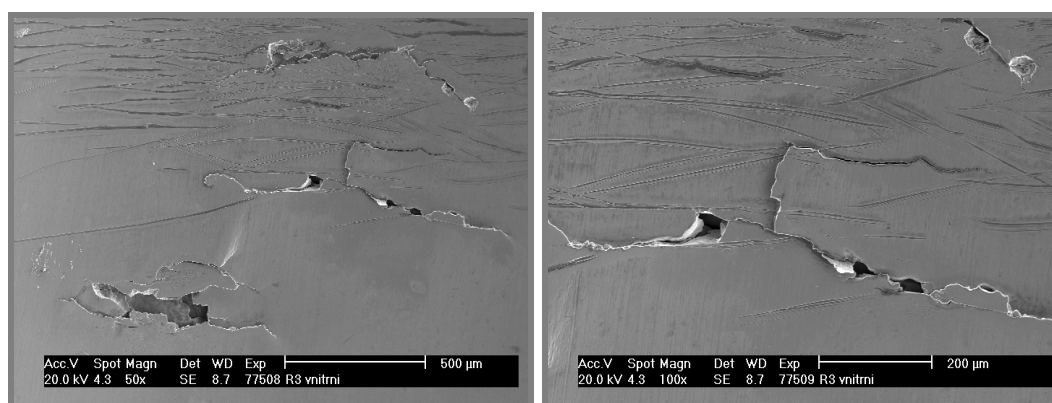
materiálu z oblasti únavových trhlin, viz obr. 5.23. Zejména v oblasti za umělým poškozením je možné pozorovat bílá místa, jako důsledek hladovění kontaktu a tedy zvýšení otěru povrchu.



Obr. 5.22 Snímky ze světelného mikroskopu – povrch ložiska po ukončení zkoušky, nepoškozené místo (vlevo) a uměle poškozené místo (vpravo) – Ložisko R3.



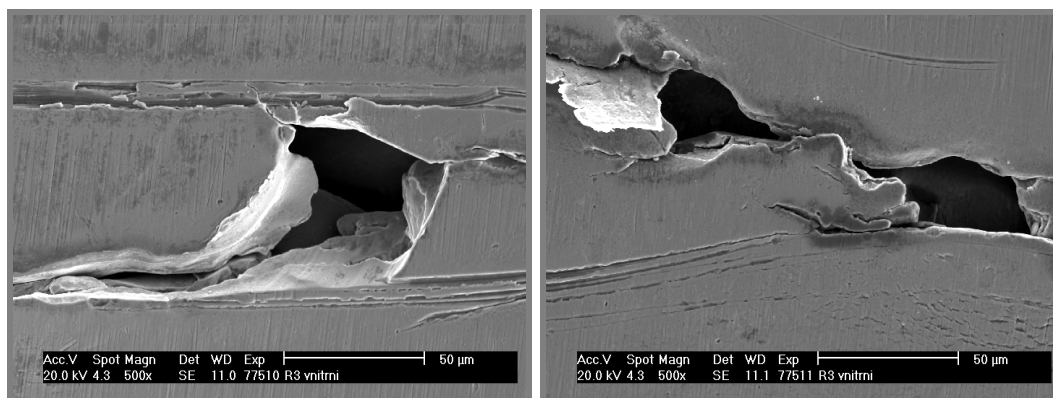
Obr. 5.23 Snímky ze světelného mikroskopu – přirozeně utvořené poškození v naočkovaném místě – Ložisko R3.



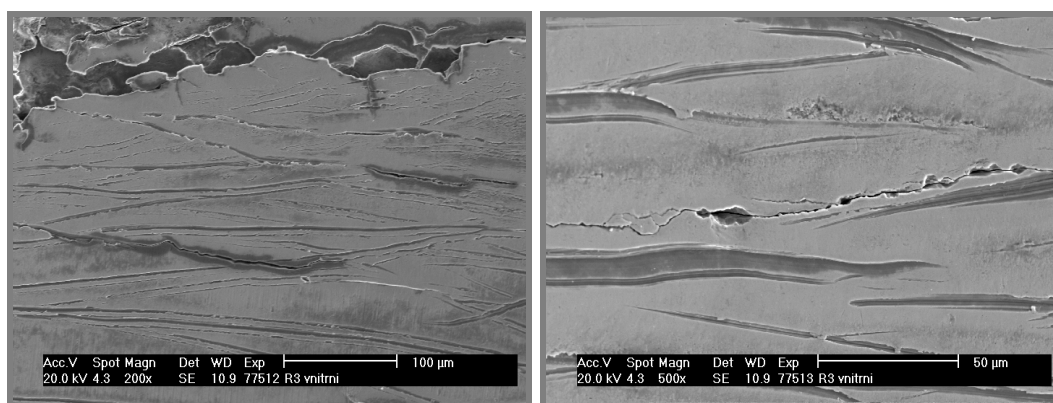
Obr. 5.24 Přirozené poškození utvořené za naočkováním místem – Ložisko R3.

Snímky na obr. 5.24 jsou pořízeny užitím elektronového mikroskopu a zobrazují stejnou oblast jaká je na obr. 5.23 (vpravo). Jedná se tedy o oblast až za umělým poškozením s udaným měřítkem a patřičným zvětšením. Jak je ze snímků patrné, na vnitřním kroužku ložiska došlo k tvorbě povrchových trhlin, které se postupně spojovaly, až došlo k vyламování větších částic materiálu. Současně je to

nejvýraznější poškození, které bylo na ložisku nalezeno. Detaily po vylomených částech jsou v 500 násobném zvětšení zobrazeny na obr. 5.25.



Obr. 5.25 Přirozené poškození utvořené za naočkováním místem – Ložisko R3.



Obr. 5.26 Přirozené poškození utvořené za naočkováním místem – Ložisko R3.

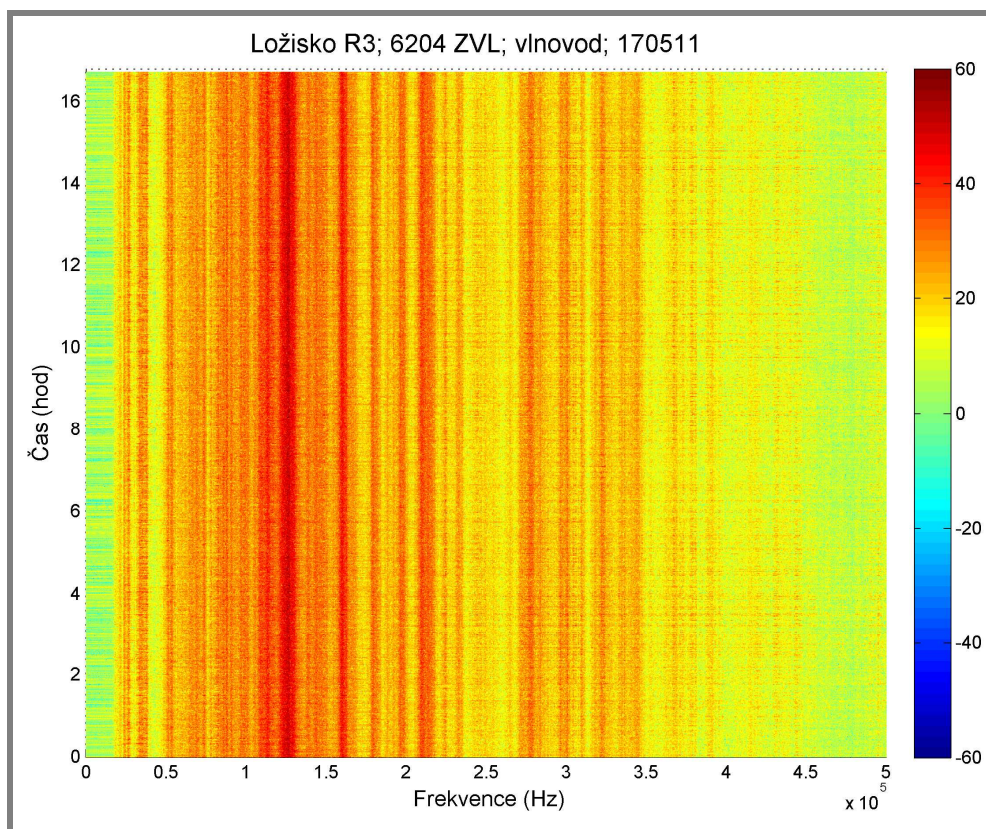
Sérii snímků poškozeného ložiska R3 uzavírá obr. 5.26, kde v levé části jsou zobrazeny trhlinky, které vznikají nejen v poškozených oblastech (v rýhách po umělém naočkování), ale i za naočkováním poškozením v místě kde dochází k úbytku maziva a tím i zvýšení tření. Poškozená místa jsou příhodným zárodkem pro vznik trhlin, protože se zde vyskytují vysoké hydrostatické tlaky maziva ulpělého v rýze. Toto mazivo pod tlakem výrazným způsobem rozrušuje povrchové vrstvy, přičemž hledá místo, kam zatéci a následně vytlačuje materiál směrem ven z povrchu. Vznik těchto trhlinek nejen v rozrušených místech následně vede ke spojování trhlin napříč kontaktní plochou, viz. obr. 5.26 (vpravo).

5.2.3 Analýza výsledků měření ve frekvenční oblasti

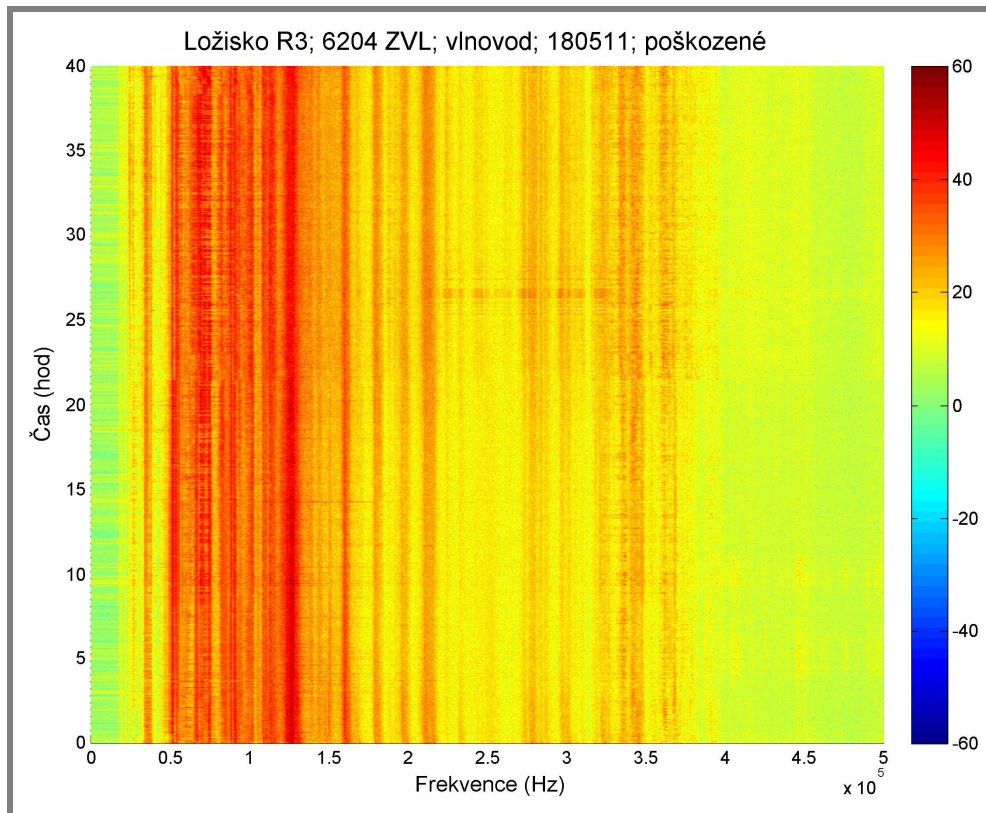
5.2.3

Analýza měření AE ve frekvenční oblasti Ložiska R3 je zobrazena spektrogramy na následujících grafech. Analýza byla stejně jako v prvním prezentovaném experimentu vytvořena v prostředí *Matlab* užitím FFT, přičemž vstupní data byla exportována z programu *DaeShow*.

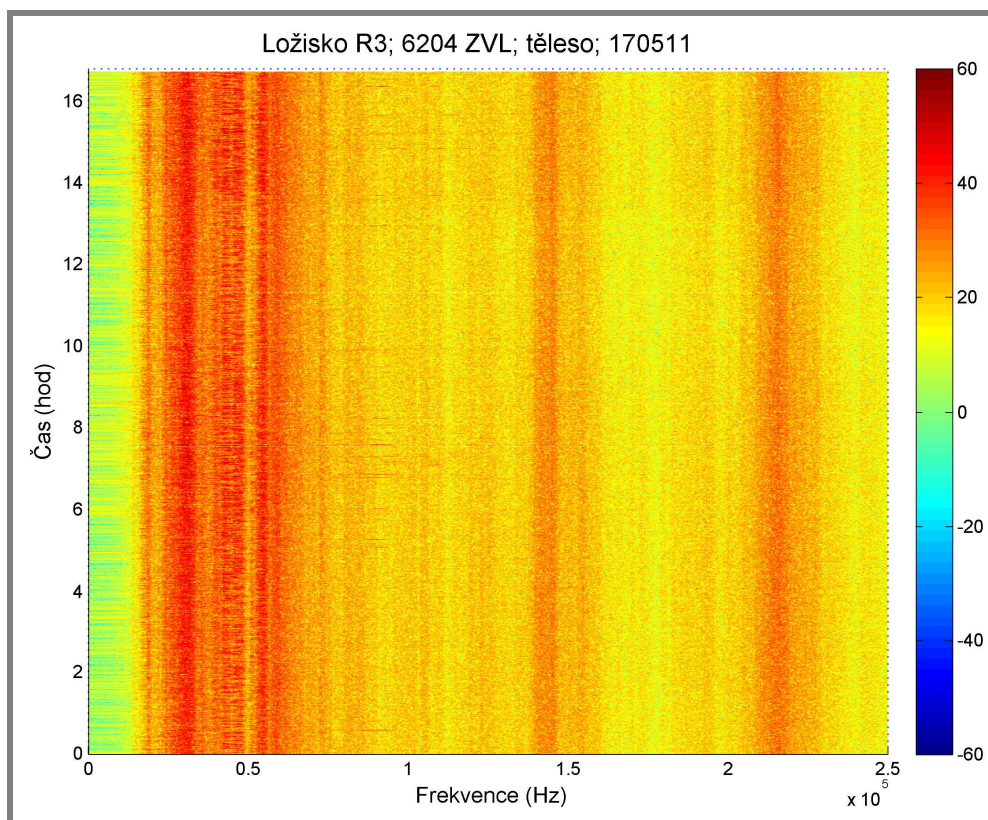
Obrázek 5.27 zobrazuje záznam téměř 17 hodin zkoušení, jedná se o poslední etapu zkoušení, než bylo ložisko vyjmuto a uměle poškozeno. Následující spektrogram na obr. 5.28 zobrazuje poslední záznam zkoušky s již naočkováním poškozením, až do zastavení celého experimentu. Oba záznamy jsou pořízeny z ložiska prostřednictvím snímače umístěného na vlnovodu.



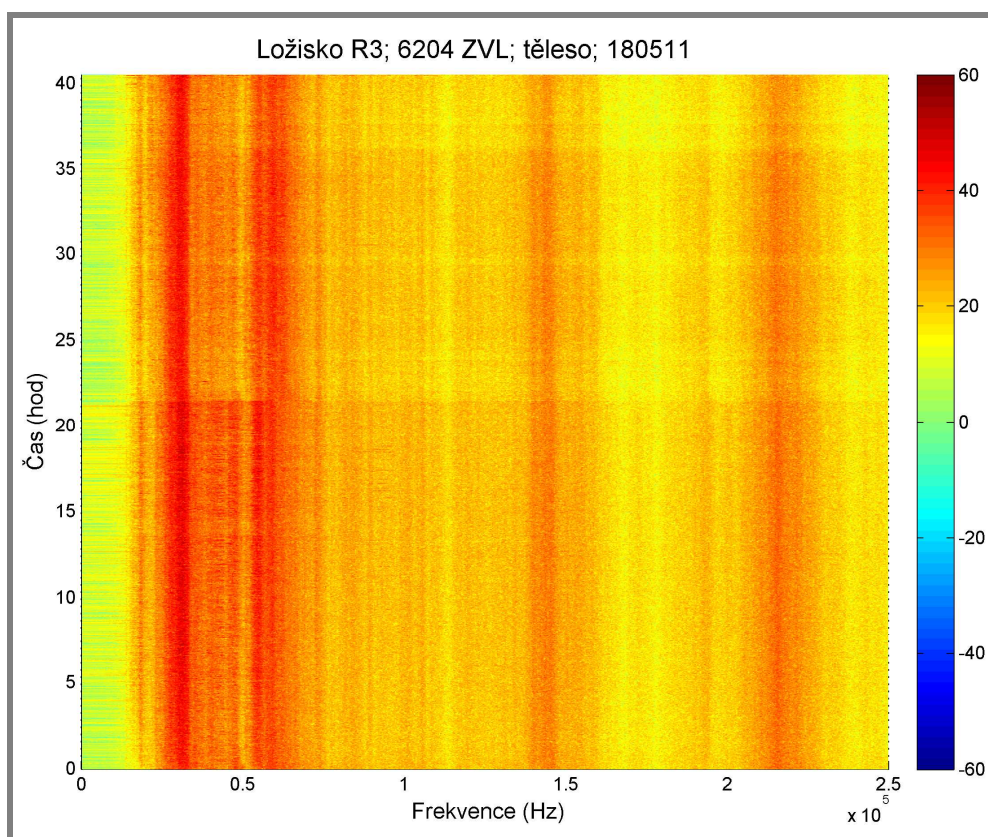
Obr. 5.27 Spektrogram signálu z vlnovodu před umělým poškozením – Ložisko R3.



Obr. 5.28 Spektrogram signálu z vlnovodu po uměle vytvořeném poškození – Ložisko R3.



Obr. 5.29 Spektrogram signálu z povrchu stanice před umělým poškozením – Ložisko R3.



Obr. 5.30 Spektrogram signálu z povrchu stanice po uměle vytvořeném poškození – Ložisko R3.

Při porovnání obou záznamů, které vznikly za podmínek stejného nastavení měření, lze konstatovat několik poznatků. Záznam před poškozením obsahuje špičky intenzity signálu (PSD) v širším spektru výskytu, přičemž dominantní složku tvoří oblast kolem 130 kHz . Záznamy jsou zobrazeny pouze do oblasti 500 kHz , ve vyšších frekvencích je signál výrazně utlumen, což je také ovlivněno použitou aparaturou.

Při porovnání záznamu z poškozeného ložiska a záznamu před poškozením je patrné plošné zeslabení intenzity, přičemž tento úbytek je možné přisuzovat změně vstupních podmínek, kdy ložisko bylo vymyto a znovu namazáno. V souvislosti s tímto je tedy možné konstatovat, že míra a čistota použitého maziva má výrazný vliv na získaný signál. Významnější úbytek intenzity je tedy možné pozorovat od 150 kHz výše, přičemž v oblasti kolem 350 kHz došlo naopak k rozšíření. V průběhu poslední zkoušky došlo průběžně k utlumení špičkové frekvence 130 kHz a posunutí spektra níže do oblasti 70 kHz . Další změna je patrná kolem 22. hodiny zkoušky, kde došlo ke skokové změně, která koresponduje s časovou oblastí.

Podobné rysy, jako u snímání z vlnovodu, lze nalézt i v případě snímání z povrchu stanice. Porovnání záznamů před a po umělém poškození je zobrazeno na obr. 5.29 a obr. 5.30. Zobrazení frekvenčních rozsahů je u snímání signálu z povrchu stanice posunuto do nižší oblasti. Tento posun je způsoben přílišným utlumením signálu, kde nad 250 kHz se významnější špičky prakticky nevyskytovaly. Charakter signálu snímání na povrchu stanice vykazuje podobné rysy jak před poškozením, tak i po něm. Tímto se záznam liší od signálu snímaného z ložiska prostřednictvím vlnovodu. Významnější změny však nastaly po 20. hodině od začátku spuštění poslední zkoušky, což je charakteristické i pro signál z ložiska a lze konstatovat, že se jedná o změny způsobené růstem poškození na ložisku. Od tohoto okamžiku nastávají v signálu změny v intenzitě, přičemž žádné výraznější frekvenční posuny se neobjevily.

Analýza signálu ve frekvenční oblasti aplikovaná na uvedené experimenty byla provedena ve formě základního pohledu na signál, přičemž hlavní důraz byl kladen na zprostředkování časově širšího pohledu na průběh zkoušky. Při analýze dat byly pozorovatelné změny signálu jak v intenzitě, tak i ve frekvenčním posunu, nicméně jednoznačné závěry týkající se přítomnosti a velikosti poškození zatím nebyly odhaleny. Problematika identifikace vzniku a růstu poškození v závislosti na frekvenčním složení generovaného signálu je značně komplikovaná nejen v souvislosti s frekvenčními posuny při růstu trhlin, potažmo tvorbě a uhlazování poškození, ale i k přenosové cestě, která ovlivňuje tvar vlny a její energii. Této problematice je nutné se věnovat i nadále a tak navázat na dosavadní výsledky. Jako jedna ze vhodných analýz by se mohla jevit vlnková transformace, která zohledňuje informaci o poloze frekvenčních složek v hitu události AE.

5.3 Zrychlené zkoušky životnosti radiálních ložisek - experiment III

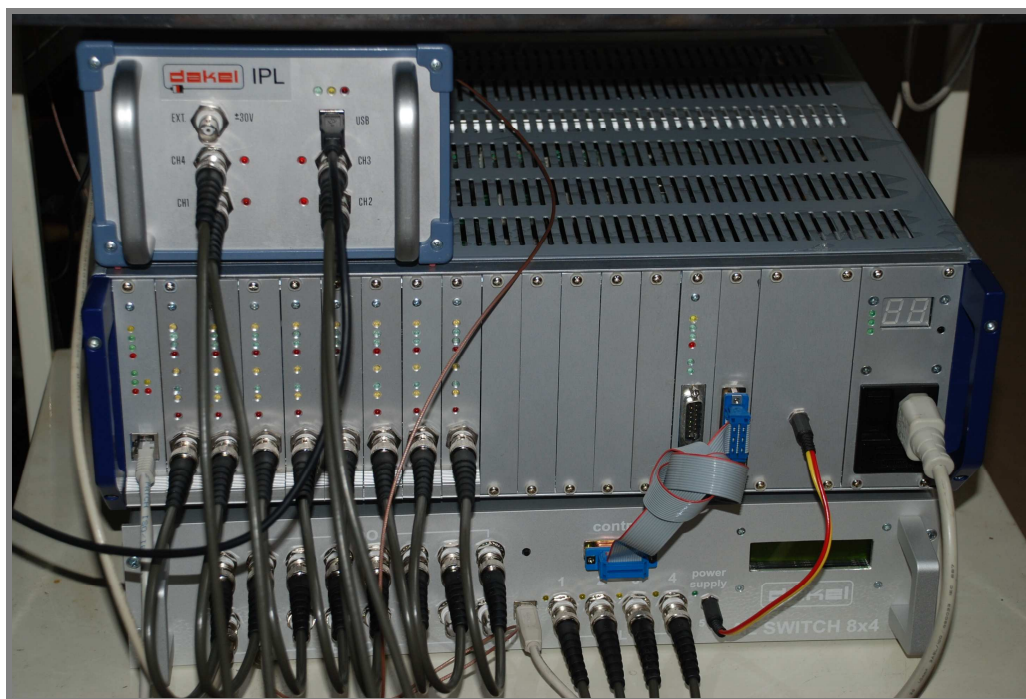
5.3

Třetím představeným experimentem je zrychlená zkouška ovlivněná zvýšením zatížení a změněnými podmínkami v mazání ložiska. Tento typ zrychlených zkoušek (destrukčních) patří v dnešní době mezi nejvíce rozšířený způsob laboratorního zkoušení ložisek. Destrukční zkoušky nejsou klasickým reprezentantem kontaktní únavy, protože tyto stavy mohou nastat v provozech pouze výjimečně, například při výpadku mazání, nebo špatně navržené soustavě pro přenos silových účinků.

5.3.1 Aparatura použitá pro záznam zrychlené (destrukční) zkoušky

5.3.1

Během experimentu byla využita nejmodernější dostupná technika (v našich podmínkách), jedná se o kombinaci zapojení analyzátoru XEDO a IPL prostřednictvím AESWITCH. Aparatura je zobrazena na obr. 5.31, sestává se z klasického analyzátoru XEDO a analyzátor IPL, který je na trhu cca 2 - 3 roky. Novinkou je možnost jejich kombinace, kterou zajišťuje AESWITCH. Analyzátor XEDO zaznamenává standardní parametry AE, které jsou prezentované v této práci experimentem I a II. Analyzátor je možné využívat pro dlouhodobé zkoušky, ze kterých mohou být výstupem i trendy z měřených parametrů. Analyzátor IPL je zaměřen na záznamy krátkých měření (cca do 4 – 5 hodin), přičemž hlavním omezujícím kritériem na délku měření je kapacita úložného média. Analyzátor zaznamenává data s rychlostí 16 MB.s^{-1} . Kombinace analyzátorů se zvolením vhodných alarmových podmínek poskytuje informace o průběhu zkoušky jak z dlouhodobého hlediska, tak i detailní záznam z úseků, které se svým chováním nějak odlišují od dlouhodobého trendu. Některé výstupy z aparatury IPL již také byly prezentovány ve článcích, které jsou uvedeny v závěru této práce. Pro snímání byly opět použity stejné snímače AE jako v předchozích experimentech. Snímač umístěný na vlnovodu označený: MTPA-15 N. 244-P12 a na tělese stanice: MDK13 N. 258-06P.



Obr. 5.31 Použitá aparatura XEDO + IPL + AESWITCH.

5.3.2

5.3.2 Nastavení vstupních parametrů a podmínek pro zkoušení

Experimentální zkouška byla opět provedena na stanici SA67 a i v tomto případě se jednalo o ložisko 6204, které nese pracovní označení R5. Cílem měření bylo provést destrukční zkoušku v rozumné časové době a analyzovat naměřený záznam vzhledem ke způsobu a rozsahu poškození. Zatížení (síla působící v radiálním směru) ložiska bylo před zkouškou nastaveno na 4,5 kN. Konzervační mazivo z nového ložiska bylo odstraněno technickým benzinem, poté se přistoupilo k namazání ložiska konzervačním olejem FUCHS ANTICORIT OHK v dostatečném množství. Citlivost stanice pro zastavení zkoušky byla nastavena na 10 dB. Celkové zesílení (Zisk) obou snímačů AE bylo nastaveno na 30 dB, souběžně byly monitorovány hodnoty teploty a vibrací.

5.3.3

5.3.3 Analýza výsledků měření v časové oblasti

Záznam celé zkoušky v podobě *Counts* je zobrazen na obr. 5.32 z vlnovodu, respektive na obr. 5.33 z tělesa stanice. Průběh snímání z vlnovodu je v prvních minutách zkoušení charakterizován standardním poklesem signálu. U ložiska dále docházelo k postupnému zvyšování intenzity až do cca 40. minuty. Průběh teploty vykazoval stabilní růst během celého měření, po rychlém náběhu ze začátku měření na cca 55 °C se teplota v podstatě lineárně zvyšovala až do hodnoty 72 °C, kdy byla zkouška ukončena pro příliš velké hodnoty vibrací. Od 40. do 80. minuty je pozorovatelný mírný pokles signálu. Od 80. minuty nastávaly výkyvy (cykly) v signálu s postupným prudkým nárůstem přes všechny hladiny (zahlcení).

Záznam signálu snímaného z tělesa má odlišný charakter, což je způsobeno zašuměním zejména od podpůrných ložisek. S rostoucí teplotou podpůrných ložisek se signál ustaluje k nižším hodnotám. Ve 24. a 40. minutě došlo k energetickým výkyvům, což je možné pozorovat i na zkoušeném ložisku. Od 80. minuty má signál velice podobný charakter jako signál snímaný z vlnovodu.

Časový průběh hitů AE snímaného jak z vlnovodu, tak i z povrchu stanice je zobrazen na obr. 5.34. Na ose x je znázorněna doba hitu (doba po kterou je zaznamenáván AE hit). Osa y určuje celkovou dobu měření zkoušky. Na ose z je amplituda signálu (AE hitů). Při porovnání obou záznamů (vlnovod x těleso) je patrný značný rozdíl. Zatímco u vlnovodu se od začátku měření objevují velké hity (jak amplitudou, tak i svojí délkou), tak u signálu z tělesa je v tomto měření poměrně konstantní průběh. Osy y a barevné škály intenzity byly voleny ve stejném měřítku, aby bylo možné porovnat útlum signálu na tělese stanice. Průběhy jsou jasné porovnatelné i vzhledem k záznamům v podobě *Counts*.

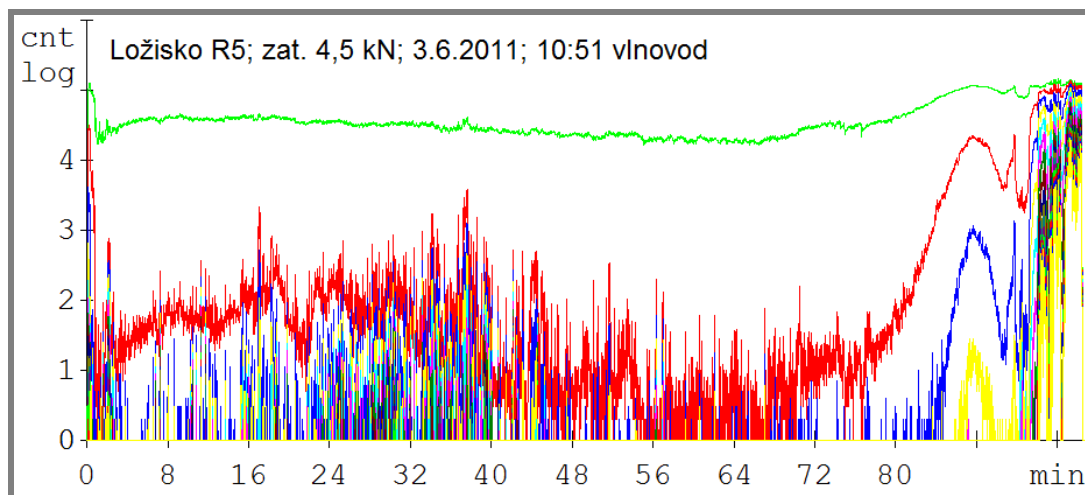
5.3.4

5.3.4 Analýza poškození ložiska zrychlenou zkouškou

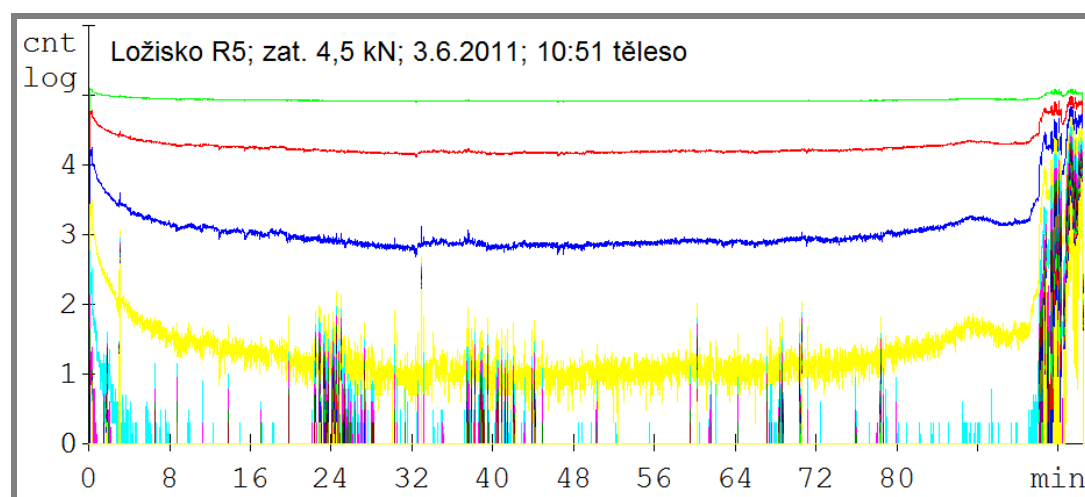
Výsledné poškození ložiska je zobrazeno na obr. 5.35. Snímek vlevo zobrazuje dráhu vnitřního kroužku ložiska, jehož povrch je poškozen výraznou oxidací. V této oxidační vrstvě se nacházejí trhliny (připomínající šupinky). Detail jedné trhliny ve zoxidovaném povrchu je na snímku vpravo.

Zvýšené teploty, jak tomu bylo v této zkoušce, výrazným způsobem ovlivňují vlastnosti použitého maziva v ložisku. V tomto případě byl použit jako mazací médium nástřik konzervačního oleje. Během zkoušení došlo k degradaci konzervační báze a jeho částečnému odpaření, po ukončení zkoušky bylo množství konzervační báze na dráze ložisku pouze minimální.

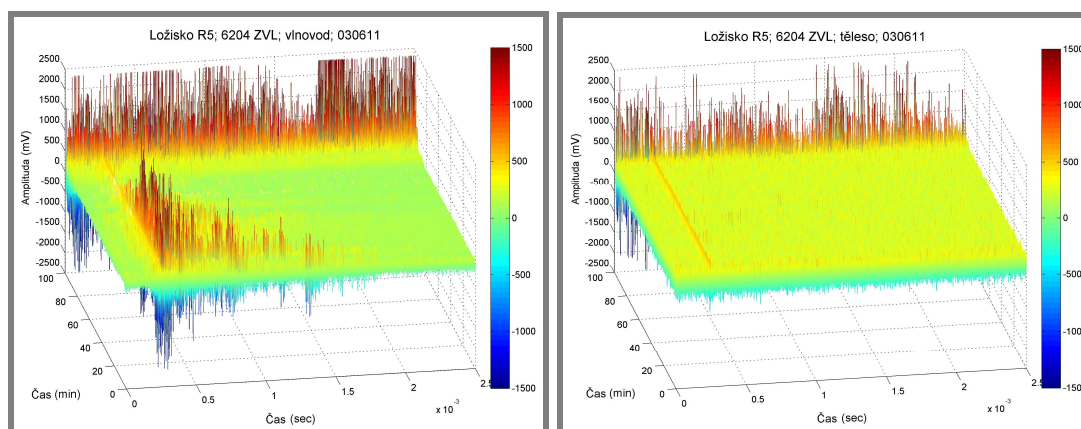
I v tomto případě byla provedena chemická analýza bodového složení z místa na snímku č. 77518, viz obr. 5.36. Analýza dokazuje přítomnost oxidů železa jako zcela zásadní složky na povrchu dráhy.



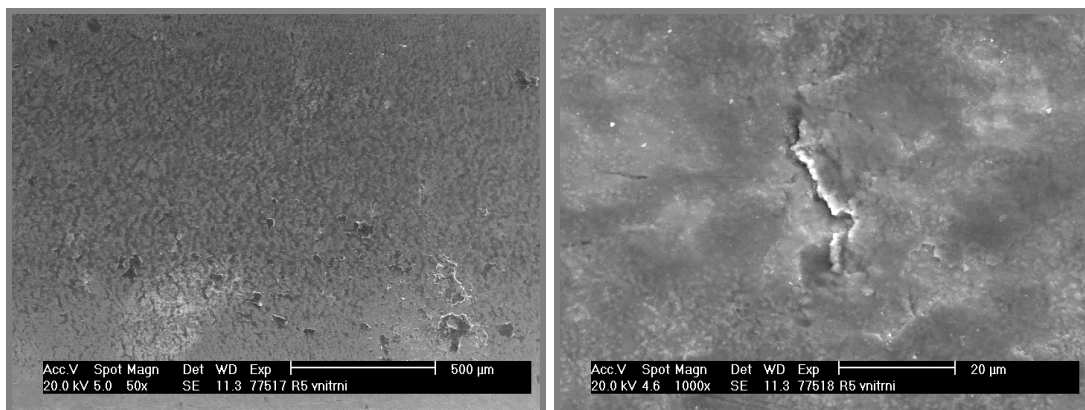
Obr. 5.32 Záznam celé zrychlené zkoušky z vlnovodu (Counts) - Ložisko R5.



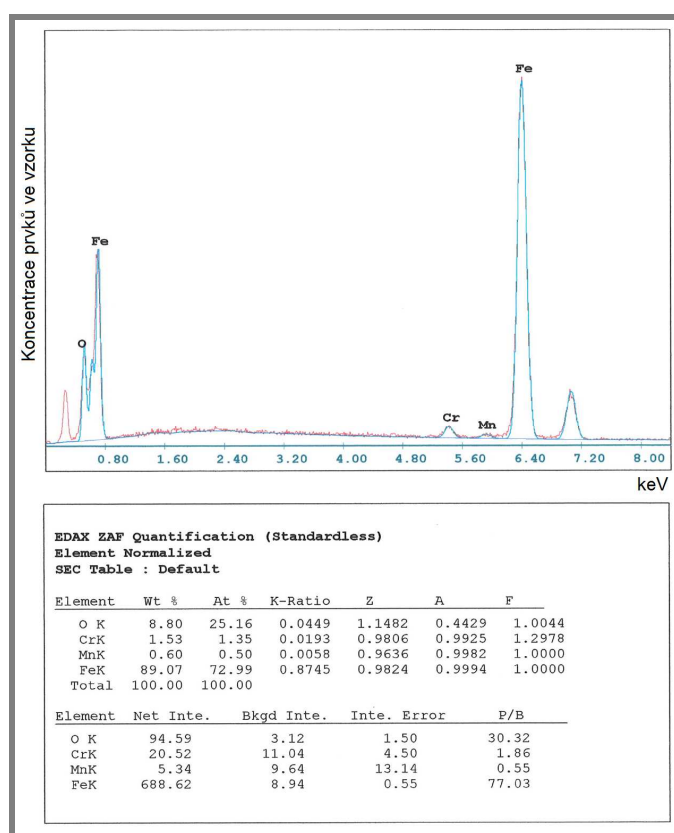
Obr. 5.33 Záznam celé zrychlené zkoušky z tělesa stanice (Counts) - Ložisko R5.



Obr. 5.34 Srovnání průběhů amplitud AE hitů z vlnovodu (vlevo) a tělesa stanice (vpravo).



Obr. 5.35 Poškození vnitřního kroužku ložiska (vlevo) a detail poškození (vpravo) - Ložisko R5.



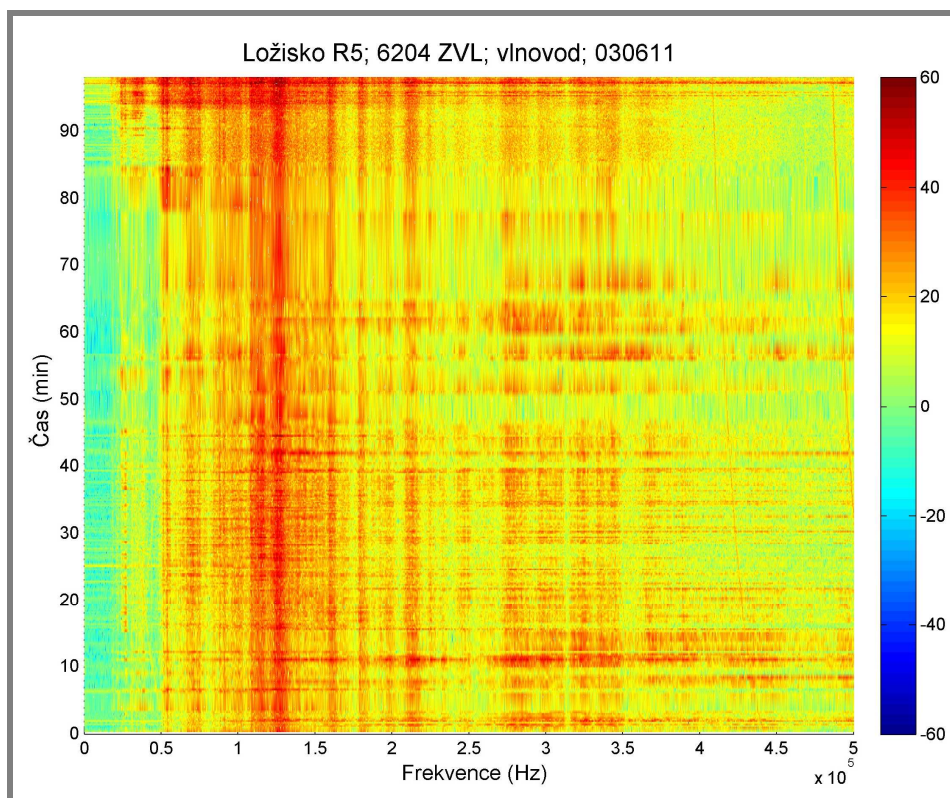
Obr. 5.36 Chemické složení bodové analýzy poškozené oblasti - 77518 R5.

5.3.5

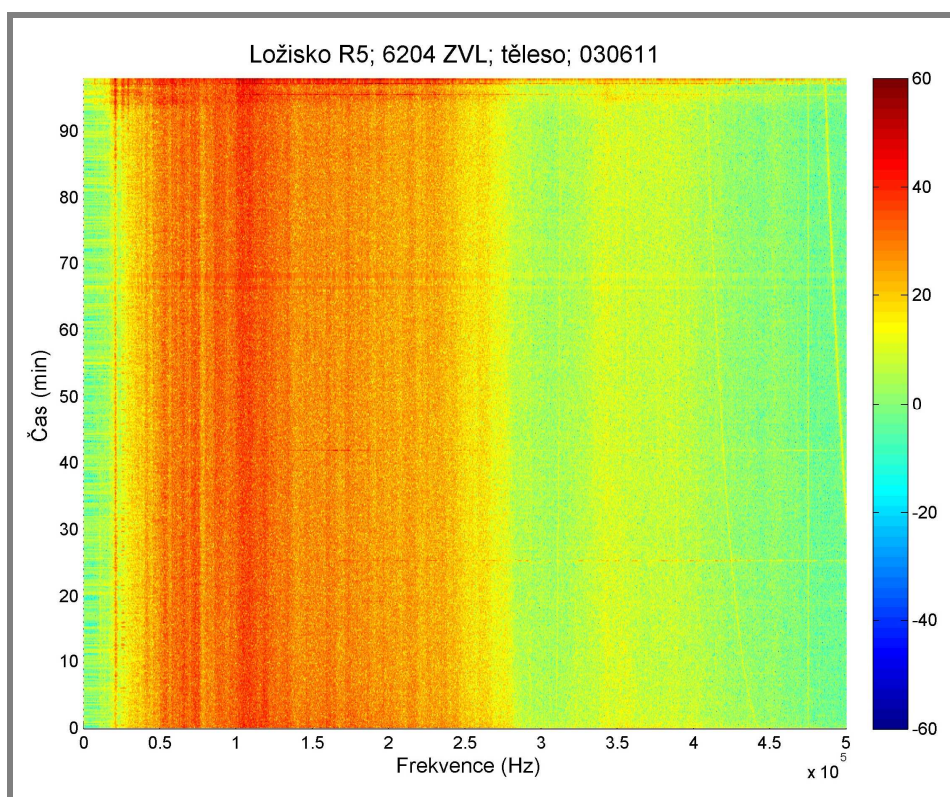
5.3.5 Analýza výsledků ve frekvenční oblasti

Spektrum celého záznamu je zobrazeno na obr. 5.37 a obr. 5.38. U tohoto měření bylo frekvenční pásmo výskytu intenzity signálu poměrně široké, zejména u signálu snímaného z vlnovodu. Dominantní složkou je podobně, jako tomu bylo v předchozím popsaném experimentu, oblast kolem 130 kHz, zároveň se zde nevyskytoval výrazný útlum nebo posun špičkových frekvencí.

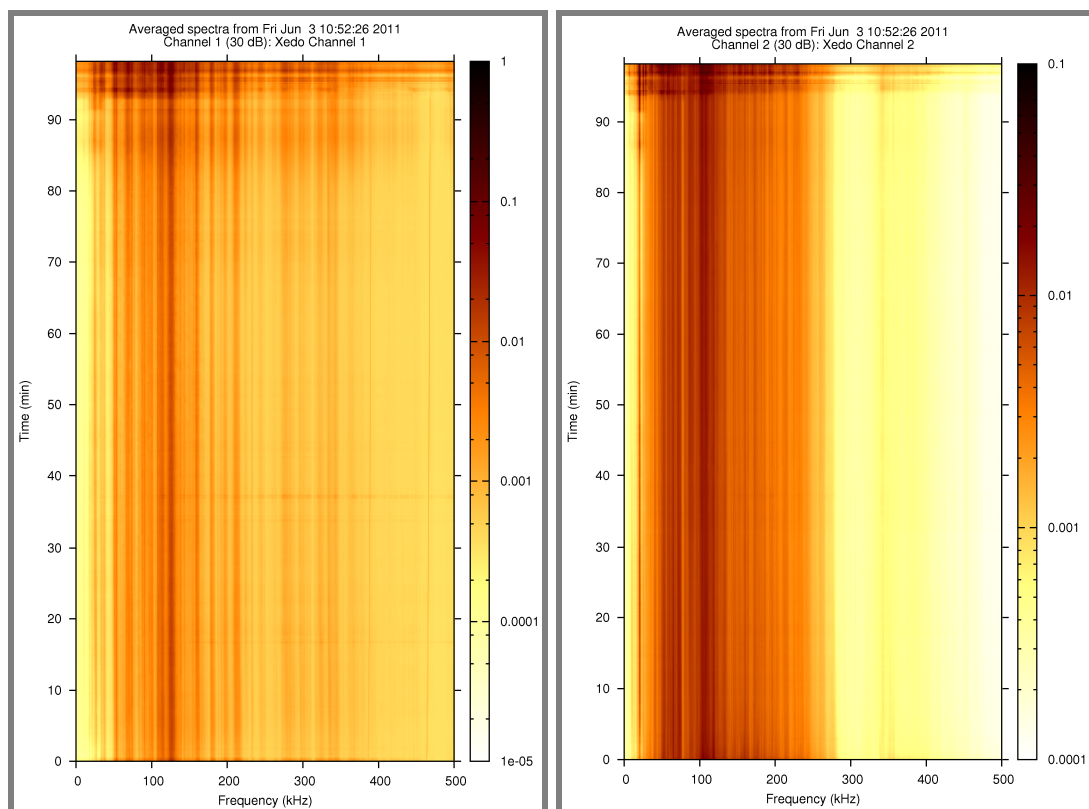
U signálu snímaného z tělesa je opět velmi široké pásmo výskytu intenzity (PSD) cca od 50 kHz do 250 kHz. Určitá změna v signálu je pozorovatelná kolem 68. minuty zkoušky, v momentě, kdy začal parametr *Counts* opět zesilovat na intenzitě, následující průběh ale pokračuje v nastoleném trendu. Výrazné změny jsou pozorovatelné pouze ke konci zkoušky (přibližně od 95. minuty).



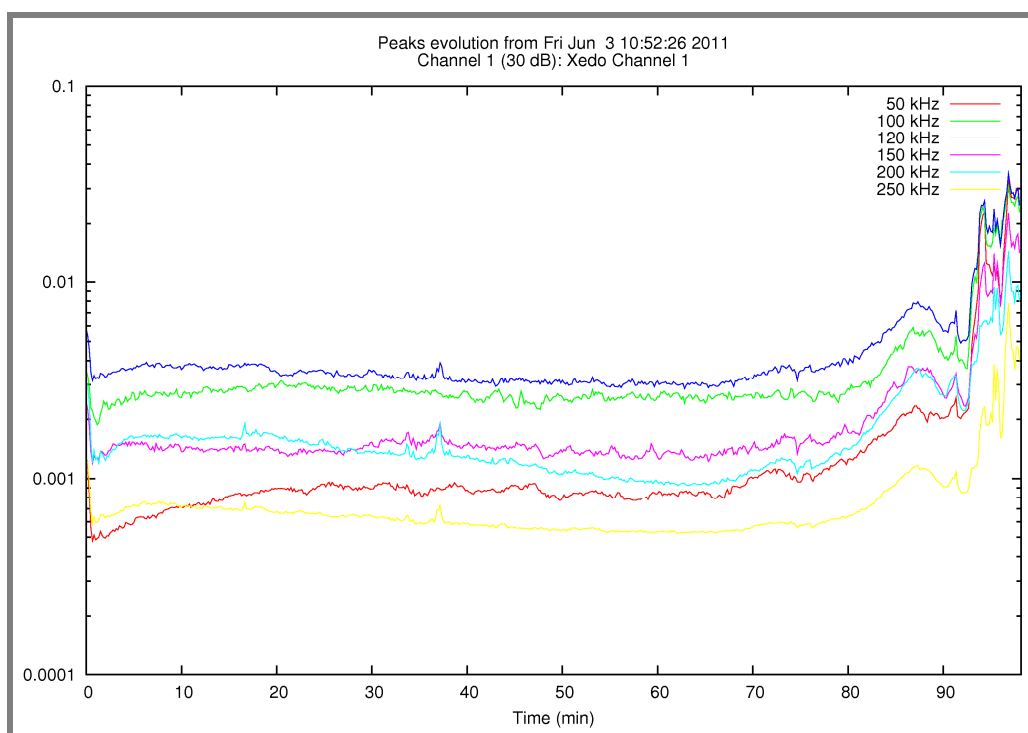
Obr. 5.37 Spektrogram signálu z vlnovodu - Ložisko R5.



Obr. 5.38 Spektrogram signálu z povrchu stanice - Ložisko R5.



Obr. 5.39 Spektrogram signálu z vlnovodu (vlevo) a povrchu stanice (vpravo) - Ložisko R5.



Obr. 5.40 Průběh vybraných spekter v měřeném úseku - Ložisko R5.

Základní záznam intenzity signálu pořízen aparaturou IPL je zobrazen na obr. 5.39, kde vlevo je záznam z vlnovodu a vpravo z tělesa stanice. Průběhy mají velmi podobný charakter jako záznamy vyexportované z aparatury XEDO. Na ose x je opět

frekvence, na ose y čas a intenzita je dána odstínem, který je vyvážen automaticky. Aparatura IPL, jak již bylo zmíněno v úvodu, získává ze signálu na dnešní dobu enormní množství dat, proto je záznam přezdíván jako záznam kontinuální. Z těchto dat lze pak vykreslovat grafy s různou hustotou informací.

Dalším možným výstupem je provádění podélných a příčných řezů spektra. Řez ve frekvenční oblasti souběžné s časovým průběhem zkoušky je zobrazen na obr. 5.40. Při vyhodnocování lze vybrat libovolný počet řezů v libovolné frekvenci možného rozsahu. Řez na záznamu je vybrán ze snímače umístěného na vlnovodu a perioda kroku byla zvolena na 50 kHz. Ze záznamu je patrné různé chování jednotlivých spektrálních čar. Zatímco nízké frekvence se vyznačovaly pozvolným nárůstem intenzity v průběhu celé zkoušky, vyšší frekvence (cca 1 000 kHz) měly rychlý nárůst a postupně ztrácely na intenzitě. Až ke konci zkoušky došlo k jejich opětovnému zvyšování, ačkoli byly výrazněji utlumeny oproti frekvencím nízkým. Podobně lze provádět a následně porovnávat frekvenční řezy z různých časových momentů zkoušky.

5.4 Analýza a zhodnocení poznatků z výsledků experimentální části

5.4

5.4.1 Experiment I

5.4.1

Dlouhodobé zkoušky jsou velice náročné na čas, finanční nároky i na množství výsledných dat. V dnešní době se využívá pro tyto dlouhodobé zkoušky měření zejména trendů specifických veličin AE a vibrací. Trendy dobře reagují na již vytvořené poškození, které je charakteristické výraznějšími amplitudami energetických vln šířícími se od zdroje poruchy. Požadavky kladené na obsluhu nákladných energetických provozů se stále zvyšují v účinnosti, s jakou lze predikovat vznikající poškození. Cílem je tedy získat dostatek času na naplánování odstávek, či procesních změn provozu zařízení. Metoda AE a aktuální dostupná technika dokáže detailněji monitorovat strojní uzel jako je například ložisko a upozornit na tvorbu únavového poškození, kontaminace, či nedostatek maziva. Nejen při dlouhodobé zkoušce byly vypořizovány varovné signály v podobě velmi strmých nárůstů a poklesů signálu AE, jejichž perioda se postupně měnila. Tyto energetické cykly byly pozorovány ještě předtím, než se začala zvyšovat celková úroveň intenzity signálu.

5.4.2 Experiment II

5.4.2

Zrychlené zkoušky způsobené iniciací počátečního poškození jsou ve světě diagnostiky ložisek poměrně častým typem monitorování. Zvláště pokud se jedná o umělé poškození o definované velikosti a porovnává se signál získaný z různých velikostí poškození. Tento způsob však v krátkodobých měřeních nepřináší informace o růstu a šíření podpovrchových trhlin. Jedná se spíše o zaznamenávání změny tvaru povrchu, detekci výčnělků, ostrých hran a dalších.

Počáteční poškození v rozumné míře však může být i iniciátorem vzniku únavového poškození (zvýšených tlaků a tvorby trhlin). Pro tuto oblast již má použití metody AE větší smysl a po odstranění výčnělků z umělých poškození je schopna zaznamenat i růst a šíření trhlin z kontaktně zatížené oblasti. Při analýze experimentu II, který se touto problematikou zabýval se citlivěji projevila detekce poškození v analýze časové oblasti. Frekvenční změny užitím FFT byly detekovatelné, nicméně s menší intenzitou, což vede k možnosti dalšího rozšíření o jiné metody vyhodnocení ve frekvenční oblasti.

5.4.3

5.4.3 Experiment III

Třetí typ experimentu je poměrně častým typem zkoušení, kdy se využívá zkrácených zkoušek formou zvýšeného zatížení, do které spadá například i změna geometrie stykových ploch. Tento způsob je značně nevýhodný, vzhledem k simulování poškození v reálných provozních podmínkách, nicméně jistě může také nastat. V těchto případech dochází vlivem zvýšených teplot k degradaci použitého maziva, což může vést ke zvětšenému otěru valivých částí, vzniku zadírání a zejména vyhrátí ložiska a tím k jeho materiálovému znehodnocení.

Poškození valivých částí v experimentu III je způsobeno zejména oxidační degradací povrchů za zvýšených hodnot tlaků a teploty. Výsledky jsou ale závislé na použitém mazivu, kde v tomto případě byla použita pouze konzervační báze, která nesplňuje požadavky kladené na maziva ložisek, jako je konzistence, či teplotní rozsah použití.

Během experimentálního testování po dobu řešení této práce bylo provedeno mnoho experimentálních zkoušek, přičemž řada z nich se zaměřovala i na zrychlené zkoušky ložisek bez náplně maziva. V těchto případech nastávalo zejména vyhrátí klece a drah na kroužcích ložiska. Častým výsledným poškozením bylo i roztržení klece. Tyto zkoušky však byly jakýmsi krajním mantinelem v celé sérii zkoušení ložisek, při kterých nenastává vznik klasického únavového poškození (pittingu).

Signál AE detekovaný za takto uměle zrychlených zkoušek vykazuje v časové oblasti obvyklou charakteristiku útlumu aktivity AE po spuštění, která pozvolna přetrvává až do prvních známek poškození s následným velice prudkým nárůstem signálu a ukončením zkoušky v důsledku zadření, roztržení klece, či přítomností jinak vzniklých rázů. Základní pohled do frekvenční oblasti užitím FFT bývá značně zašuměný a nevykazuje známky výrazného projevu poškození v posunech, či intenzitě špičkových frekvenčních složek.

5.5

5.5 Význam nových získaných poznatků

- * Experimenty provedené v rámci řešení dizertační práce ověřily schopnost metody akustické emise detekovat vznik a šíření poškození radiálních ložisek.
- * V signálu AE byly nalezeny energetické cykly (dosud nepublikováno), které odráží aktuální stav sledovaného ložiska, tyto výsledky odhalují možnost poukázat na začínající poškození ještě dříve, než dojde k navýšení celkové intenzity signálu AE a současně také dříve, než poruchu detekují vibrace a teplota.
- * Významným přínosem byla spolupráce na vývoji nové aparatury (XEDO–IPL–AESWITCH), která je v současné době na špičkové úrovni dosavadních analyzátorů.
- * V problematice zrychlených zkoušek je vhodné volit počáteční iniciaci, která se později rozvine v přirozené únavové poškození na povrchu zkoušeného ložiska.
- * Provedené konstrukční úpravy stanice poskytují možnosti detailnějšího sledování trvanlivostních zkoušek jak metodou AE, tak i vibracemi a teplotou.
- * Vytvoření postupu identifikace vzniku poškození radiálních ložisek (Příloha 1) je specificky zaměřeno na radiální ložiska zkoušená na stanici SA67 a je přínosem pro další rozvoj vědeckého bádání v této oblasti. Metodika vychází z normy AE 13554 (Všeobecné zásady) a významným způsobem ji rozšiřuje a upravuje pro konkrétní trvanlivostní zkoušky. Tato metodika obsahuje rovněž postup pro společné měření AE, vibrací a teploty s kompletní analýzou vyhodnocení základních parametrů AE.

6 ZÁVĚR

Dizertační práce shrnuje aktuální poznatky z diagnostiky ložisek metodou akustické emise (AE) prezentované světovými autory a rozšiřuje je o další výzkum specificky zaměřený na diagnostiku radiálních ložisek.

Provedená rešerše ukazuje jako nejčastěji využívaný parametr hodnocení poškození efektivní hodnotu signálu (Root-Mean-Square). Dále se některé práce dostávají do lehkého sporu o adekvátnost posuzování míry poškození parametrem *maximální amplituda hitu*. Ve většině případů se při dlouhodobých zkouškách trvanlivosti ložisek využívá pouze trendů sledovaných parametrů, což může vést k zahlušení informace o počátku poškození. Teoretická část rovněž obsahuje srovnání používaných diagnostických metod, přičemž bylo potvrzeno, že metoda akustické emise má v aplikaci kontaktní únavy své opodstatnění a ve většině případů vykazuje prvenství, zvláště jedná-li se například o lokalizaci poškození. Součástí přípravy před experimentální částí bylo též studium použití vhodných vazebných prostředí, z nichž jsou nejvýhodnější ultrazvukové gely a kyano-akrylátová lepidla. Teoretická část práce rovněž obsahuje souhrn nejvýznamnějších druhů poškození ložisek, což velice úzce souvisí s experimentálním zkoušením.

Pro experimentální zkoušky radiálních ložisek bylo nutné provést konstrukční úpravy stávajícího zkušebního zařízení, označeného jako SA67. Vedle konstrukčních úprav stanice proběhl i návrh a výroba speciálních vlnovodů pro přenos signálu AE, vibrací a teploty přímo z povrchu vnějšího kroužku zkoušeného ložiska.

Během experimentální části bylo provedeno mnoho trvanlivostních zkoušek, přičemž tato práce obsahuje výběr ze tří typů podrobně popsanych experimentů. Experimenty v oblasti dlouhodobých zkoušek prokázaly nejen citlivost metody AE k detekci vznikajícího únavového poškození, ale i k reakci na poškození spojených např. v důsledku zvýšené kontaminace maziva prachovými částicemi, s následným zvýšeným otěrem a nedostatečnou funkcí mazání (Experiment I). Dalším řešeným problémem byly zrychlené experimentální zkoušky, které naprostá většina autorů posuzuje z hlediska odezvy na uměle utvořené poškození a to právě v závislosti na jeho velikosti. Práce uvádí výhodnější využití uměle vytvořeného poškození, které figuruje jako iniciátor vzniku poškození přirozeného. Následně lze změny v signálu přiřadit k počátkům tvorby únavových trhlin a jejich růstu. Uměle vytvořené poškození by mělo být specifické svojí schopností přerušit film v místě kontaktu a vytvořit oblast se zvýšeným třením (Experiment II). Třetím typem experimentu byla doložena neopodstatněnost zrychlených zkoušek vlivem nadměrného přetížení ložiska, či vzniku podmínek valení bez přísunu maziva do kontaktu. V takových případech dochází velmi rychle k degradaci maziva, zejména vlivem vysokých teplot, následuje vznik oxidů na povrchové vrstvě valivé dráhy nebo vyhřátí ložiska (Experiment III).

V experimentech byly sledovány a následně důkladně analyzovány standardní parametry AE. Parametry *RMS* a *Counts* vykazovaly velice podobné, až identické průběhy, přičemž citlivější reakci s využitím až šestnácti energetických prahů prokázal *Counts*. Oba energetické parametry byly posuzovány a vzájemně porovnávány jak z povrchu zkoušeného ložiska, tak i z povrchu zkušební stanice. V signálu byly objeveny energetické výkyvy se skokovými změnami, jejichž perioda se v průběhu zkoušení výrazně měnila. Výskyt těchto energetických cyklů je částečně patrný v záběhové části, pak dochází k uklidnění a znovu se tyto cykly objevují s mnohem četnějším počtem ještě před zvyšováním celkové intenzity signálu a

zastavením zkoušky. Přítomnost těchto cyklů v signálu byla potvrzena jak z povrchu ložiska, tak i z povrchu tělesa stanice. Toto zjištění dokládá hypotézu, že i ze zašuměné části diagnostikovaného objektu (v tomto případě z tělesa stanice) je možné odhalit počáteční stadia a růst poškození.

Analýza poškození detailním rozborem vlastností hitů událostí AE ukázala na značnou omezenost detekce u složitějších strojních uzlů, kde cesta šíření vln od poruchy ke snímači je složena z více kontaktních přechodů a komponent. Zatímco na ložisku byly odezvy poškození poměrně jasně čitelné, zvláště u parametru *Maximální amplituda*, na tělese byly hity výrazně utlumeny. Tento poznatek je doložen i monitorováním axiálně zatížených vzorků a ložisek, kde jednodušší konstrukce umožnila snáze odhalit vznikající poškození právě parametrem *Maximální amplituda* (Publikace autora k dané problematice).

Při řešení dizertační práce byly všechny dílčí cíle splněny. Práce si vyžádala teoretickou přípravu (rešeršní činnost), konstrukční úpravy zkušebního zařízení a sérii experimentů za různých provozních podmínek. Výsledkem jsou tři prezentované experimenty s přínosem detailnějšího popisu signálu vzhledem ke vzniku poškození ložisek, dále vypracovanou metodikou a nastavením řetězce společného měření signálu AE, vibrací a teploty. Dalším přínosem práce je teoretické podílení se na vývoji aparatury, která by zajišťovala průběžný záznam a současně i kontinuální záznam při zvýšených prahových hodnotách sledovaných parametrů. Výsledkem spolupráce je aparatura XEDO + AESWITCH + IPL, která je v tomto užití zatím průlomová.

7 SEZNAM OBRÁZKŮ**7**

Obr. 2.1 Zjednodušené schéma vzniku a detekce elastických vln v materiálu.	11
Obr. 2.2 Primární a sekundární zdroj událostí spojených se vznikem a růstem trhliny [8].	12
Obr. 2.3 Ukázka hitu AE (nespojitého signálu - Burst).	13
Obr. 2.4 Ukázka Hammingova okna a jeho frekvenční odezvy [12].	17
Obr. 2.5 Schematický diagram testovací výbavy [16].	20
Obr. 2.6 Špičky amplitud akustické emise s defektem dráhy vnějšího kroužku [16].	21
Obr. 2.7 Porovnání monitorovacích technik pro minimální velikost defektu [16].	21
Obr. 2.8 Porovnání monitorovacích technik pro maximální velikost defektu [16].	21
Obr. 2.9 Záznam napětových pulsů z defektu dráhy vnitřního kroužku ložiska [17].	23
Obr. 2.10 Závislost velikosti zatížení a rychlosti otáčení na střední hodnotě signálu AE [17].	23
Obr. 2.11 Záznam AE Distress® pro dva převody při 500 min ⁻¹ [22].	24
Obr. 2.12 Záznam AE RMS pro vyvážené a nevyvážené podmínky [22].	24
Obr. 2.13 Záznam vibračního zrychlení v axiálním i radiálním směru měření [22].	25
Obr. 2.14 Frekvenční spektrum se špičkou 90,67 Hz a jejími násobky [18].	27
Obr. 2.15 Graf průběhu studie I se všemi sledovanými parametry v závislosti na čase [31].	28
Obr. 2.16 Bezdrátový senzor teploty instalovaný na kuličkovém ložisku [23].	29
Obr. 2.17 Kalibrační výsledky teplotního snímače [23].	29
Obr. 2.18 Záznam teploty během experimentální zkoušky ložiska upnutého v soustruhu. [23].	30
Obr. 2.19 Rozdíl parametrů PR u poškozeného a zdravého ložiska pro vibrace (vlevo), ultrazvuk (vpravo) [27].	31
Obr. 2.20 Porovnání frekvenčních spekter u poškozeného a zdravého ložiska pro vibrace (vlevo), ultrazvuk (vpravo) [27].	32
Obr. 2.21 Testovací stanice s detaily jednotlivých částí [31].	34
Obr. 2.22 Standardní sledované AE parametry v závislosti na čase v průběhu zkoušky [31].	36
Obr. 2.23 Lokalizace poškození testovaného kroužku případové studie I [31].	36
Obr. 2.24 Výsledné poškození testovaného kroužku [31].	37
Obr. 2.25 Ukázka testovaného ložiska [34].	38
Obr. 2.26 Lokalizační diagram AE aktivity [34].	39
Obr. 2.27 Geometrie testovaných válců a schematický diagram sběru dat [35].	40
Obr. 2.28 Poměr počtu zásahů AE / min a zrychlení vibrací během testu [35].	40
Obr. 2.29 Záběhový stav (vlevo) a ustálený stav (vpravo) [35].	41
Obr. 2.30 AE překmity 10 minut před ukončením zkoušky (vlevo) a morfologie poškození povrchu (vpravo) [35].	41
Obr. 2.31 Pohled na průřez poškození hnaného válce [35].	42
Obr. 2.32 Schéma použité měřicí aparatury [36].	43
Obr. 2.33 Citlivost snímače S9280 pro podélné vlnění různých vazebních prostředí [36].	44
Obr. 2.34 Citlivost snímače S9280 pro příčné vlnění různých vazebních prostředí [36].	44
Obr. 2.35 PSD zkoušených vazebních prostředí [37].	46

Obr. 2.36 Poškození kroužku ložiska <i>FALSE BRINELLING</i> (vlevo) a <i>FRETING</i> koroze (vpravo) [34], [39].	49
Obr. 2.37 Trhliny na vnitřním kroužku ložiska (vlevo) a vyjiskření na vnitřním kroužku ložiska [39].	49
Obr. 4.1 Zkušební stanice SA67 [42].	53
Obr. 4.2 Kontrolní panel stanice SA67 [42].	54
Obr. 4.3 Model stanice SA67 - pohled zepředu.	54
Obr. 4.4 Model stanice SA67 - pohled z boku.	55
Obr. 4.5 Úprava pouzdra pro zkoušené ložisko [42].	56
Obr. 4.6 Speciální snímač vibrací a teploty (vlevo) a standardní snímač vibrací a teploty (vpravo).	56
Obr. 4.7 Model stanice SA67 – detail.	57
Obr. 4.8 Model stanice SA67 - detail klíčového uzlu.	57
Obr. 5.1 Nastavení AE – slot 1.	59
Obr. 5.2 Záznam počtu překmitů (Counts) a sumačních událostí AE (Events) – slot 1.	60
Obr. 5.3 Záznam počtu překmitů (Counts) a sumačních událostí AE (Events) – slot 2.	60
Obr. 5.4 Záznam Count1, Count2 a RMS – slot 1 z 050111.	61
Obr. 5.5 Záznam Count1, Count2 a RMS – slot 2 z 050111.	61
Obr. 5.6 Přehled záznamů <i>Counts</i> a sumačních <i>Events</i> – Ložisko R2.	62
Obr. 5.7 Přehled záznamů <i>délky trvání</i> sumačních <i>Events</i> – Ložisko R2.	63
Obr. 5.8 Přehled záznamů <i>doby náběhu (risetime)</i> sumačních <i>Events</i> – Ložisko R2.	64
Obr. 5.9 Přehled záznamů <i>amplitudy</i> sumačních <i>Events</i> – Ložisko R2.	65
Obr. 5.10 Záznam průběhu vibrací a teploty na ložisku z poslední etapy zkoušky – Ložisko R2.	66
Obr. 5.11 Záznam průběhu vibrací a teploty na tělese z poslední etapy zkoušky – Ložisko R2.	66
Obr. 5.12 Záznam průběhu frekvenčního spektra z vlnovodu – Ložisko R2.	67
Obr. 5.13 Záznam průběhu spektrogramu z vlnovodu – Ložisko R2.	68
Obr. 5.14 Zobrazení špiček v čelním pohledu na 3D graf (obr. 10.12) – Ložisko R2.	68
Obr. 5.15 Frekvenční charakteristika snímače umístěného na vlnovodu – Ložisko R2.	69
Obr. 5.16 Poškození vnějšího kroužku – Ložisko R2.	70
Obr. 5.17 Detail poškození – Ložisko R2 (vlevo) a poškození nového ložiska (vpravo).	70
Obr. 5.18 Chemické složení bodové analýzy poškozené oblasti - 77504 R2.	71
Obr. 5.19 Chemické složení bodové analýzy nového ložiska.	71
Obr. 5.20 Záznam záběhu nového ložiska v podobě překmitů (Counts) – Ložisko R3.	72
Obr. 5.21 Záznam před poškozením (vlevo) a po uměle vytvořeném poškození (vpravo) – Ložisko R3.	73
Obr. 5.22 Snímky ze světelného mikroskopu – povrch ložiska po ukončení zkoušky, nepoškozené místo (vlevo) a uměle poškozené místo (vpravo) – Ložisko R3.	74
Obr. 5.23 Snímky ze světelného mikroskopu – přirozeně utvořené poškození v naočkovaném místě – Ložisko R3.	74

Obr. 5.24 Přirozené poškození utvořené za naočkovaným místem – Ložisko R3.	74
Obr. 5.25 Přirozené poškození utvořené za naočkovaným místem – Ložisko R3.	75
Obr. 5.26 Přirozené poškození utvořené za naočkovaným místem – Ložisko R3.	75
Obr. 5.27 Spektrogram signálu z vlnovodu před umělým poškozením – Ložisko R3.	76
Obr. 5.28 Spektrogram signálu z vlnovodu po uměle vytvořeném poškození – Ložisko R3.	76
Obr. 5.29 Spektrogram signálu z povrchu stanice před umělým poškozením – Ložisko R3.	77
Obr. 5.30 Spektrogram signálu z povrchu stanice po uměle vytvořeném poškození – Ložisko R3.	77
Obr. 5.31 Použitá aparatura XEDO + IPL + AESWITCH.	79
Obr. 5.32 Záznam celé zrychlené zkoušky z vlnovodu (Counts) - Ložisko R5.	81
Obr. 5.33 Záznam celé zrychlené zkoušky z tělesa stanice (Counts) - Ložisko R5.	81
Obr. 5.34 Srovnání průběhů amplitud AE hitů z vlnovodu (vlevo) a tělesa stanice (vpravo).	81
Obr. 5.35 Poškození vnitřního kroužku ložiska (vlevo) a detail poškození (vpravo) - Ložisko R5.	82
Obr. 5.36 Chemické složení bodové analýzy poškozené oblasti - 77518 R5.	82
Obr. 5.37 Spektrogram signálu z vlnovodu - Ložisko R5.	83
Obr. 5.38 Spektrogram signálu z povrchu stanice - Ložisko R5.	83
Obr. 5.39 Spektrogram signálu z vlnovodu (vlevo) a povrchu stanice (vpravo) - Ložisko R5.	84
Obr. 5.40 Průběh vybraných spekter v měřeném úseku - Ložisko R5.	84

8 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1	Vypočtené frekvence poškození testovaných ložisek [18].	26
Tab. 2.2	Část tabulky obsahující data pro případovou studii I [31].	35
Tab. 2.3	Přehled sledovaných parametrů vybraných vazebných prostředí [37].....	46
Tab. 2.4	Přehled výsledků odezvy signálu vybraných vazebných prostředí [38]. ...	47

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**9**

AE	akustická emise
ASL	průměrná hodnota amplitudy signálu akustické emise
Axmat	experimentální zkušební stanice pro axiálně zatížené vzorky
Burst	praskavý nespojitý signál
Counts	počty překmitů přes nastavené prahové úrovně
Crest	poměr maximální amplitudy a efektivní hodnoty (CF)
Duration	doba trvání události
Dristress®	parametr pro identifikaci poškození (Holroyd Instrument)
DFT	diskrétní Fourierova transformace
Events	parametr popisující hity AE
FFT	rychlá Fourierova transformace
Hit	označuje událost AE, která překročila detekční práh
Kurtosis	koeficient špičatosti
Pitting	kontaktní poškození povrchu
PSD	spektrální hustota výkonu
Rmat	experimentální zkušební stanice pro válcové vzorky
RMS	efektivní hodnota signálu
SA67	experimentální zkušební stanice pro radiální ložiska
Skewness	koeficient šikmosti
SPM	metoda rázových pulsů
c	rychlost šíření zvuku
d	průměr valivých elementů
D	roztečný průměr valivých elementů v ložisku
E_S	nastavený práh pro začátek vzorkování události
E_E	nastavený práh pro ukončení vzorkování události
f_{vz}	vzorkovací frekvence
f_{max}	maximální frekvence obsažená v signálu
F	radiální zatížení
G_{xx}(f)	jednostranná spektrální hustoty
L	šířka ložiskového kroužku
m	proměnná intervalu (1 – 3)
n	rychlost otáčení hřídele
N	počet hodnot z výpočtové oblasti
N_b	počet valivých elementů
N_C	počet překmitů
N_E	počet událostí
N_{c1}	první prahová hodnota amplitudy signálu (Count)
N_{c2}	druhá prahová hodnota amplitudy signálu
N_{cn}	n-tá prahová hodnota amplitudy signálu
NT	celková doba signálu
p	akustický tlak
R	poloměr hřídele

$R_{xx}(\tau)$	autokorelační funkce
R_z	drsnost povrchu určená největší výškou profilu
$S_{xx}(f)$	dvoustranná spektrální hustota
t_d	doba trvání mrtvé doby
t_r	doba náběhu signálu
t_w	doba trvání signálu
U_{max}	maximální amplituda signálu
$w(k)$	Hammingovo okno
W_c	frekvence defektu klece
W_b	frekvence defektu valivého elementu
W_{bp}	frekvence defektu vnějšího kroužku
W_{bpi}	frekvence defektu vnitřního kroužku
Z	akustická impedance prostředí
α	stykový úhel kuličky s ložiskovými kroužky
μ	dynamická viskozita za normální teploty
v	rychlost kmitání hmotných částic (vlnění)
ρ	hustota prostředí
σ	směrodatná odchylka
π	Ludolfovo číslo

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOPEC, Bernard; a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 1. vyd. Brno : CERM s.r.o., 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] KAWAMOTO, S.; SAM, W. R. *Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A review*. Gen. Tech. Rep. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2002. 16 p. GTR-FPL-134.
- [3] BLAHACEK, M. *Acoustic Emission Source Location Using Artificial Neural Networks*. PhD Thesis. Prague : Institute of Thermomechanics AS CR, 1999. 177 p.
- [4] GROSSE, CH. U., OHTSU, M. History and fundamentals. *Acoustic emission testing. Basic for research – Application in civil engineering*. Leipzig : Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 11-18. ISBN 978-3-540-69895-1.
- [5] YOON, D. J., KWON, O. Y., CHUNG, M. H., KIM, K. W. Early Detection of Damages in Journal Bearings by Acoustic Emission Monitoring. *Journal of acoustic emission*, CA, USA : ACOUSTIC EMISSION GROUP. ETATS-UNIS, 1995, vol. 13, pp. 1-10. ISSN 0730-0050.
- [6] DROUILLARD, T. F. A History of Acoustic Emission. *Journal of acoustic emission*, CA, USA : ACOUSTIC EMISSION GROUP. ETATS-UNIS, 1996, vol. 14, pp. 1-34. ISSN 0730-0050.
- [7] HORT, F., VLAŠIC, F. MAZAL, P. Vybrané aplikace metody AE v Ústavu konstruování FSI VUT v Brně. In *49. Int. Conf. KCMS 2008, Srní 8. - 10. 9. 2008*, ZČU Plzeň, 2000, s. 87-90. ISBN 978-80-7043-718-6.
- [8] Scruby, C. B. Instrument Science and Technology. *An Introduction to Acoustic Emission. Journal of Physics E, Scientific Instruments*, 1987, pp. 8. 20: 946-953.
- [9] BARAN, I., NOWAK M., DARSKI, W. Application of Acoustic Emission in Monitoring of Failure in Slide Bearings. *Journal of Acoustic Emission*, ACOUSTIC EMISSION GROUP, Encino, CA, USA, 2007, Vol. 25, pp. 341-347, ISSN 0730-0050.
- [10] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [11] Harris, Fredric. J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 1, Jan. 1978, pp. 51-83.
- [12] Window function. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 11 June 2003 , last modified on 28 February 2011 [cit. 2011-02-28]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Window_function>
- [13] TIMMERMAN, H. Monitoring the Winds of Change. *EVOLUTION Business and technology magazine from SKF* [online]. 2006, Vol. 3, no. 3/06, [cit. 2011-03-12]. Dostupný z WWW: <<http://evolution.skf.com/zino.aspx?articleID=14982>>

- [14] ZOLADZ. T., EARHART. E., FIORUCCI. T. Bearing Defect Signature Analysis Using Advanced Nonlinear Signal Analysis in a Controlled Environment. *NASA Technical Memorandum 108491*, U. S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE, 1995, pp. 38. 633 - 109 / 20043.
- [15] ZHOU, Wei. *Incipient Bearing Fault Detection for Electric Machines Using Stator Current Noise Cancellation*. PhD Thesis. Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2007. 184 p.
- [16] 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. *Mechanical systems and signal processing*. Vol. 21, No. 1, INDE : ITMME Centre. New Delphi, 2005, pp. 244-256, ISSN 0888-3270.
- [17] HOLROYD, T., J. Acoustic Emission as a Basis for the Condition Monitoring of Industrial Machinery. *Holroyd instruments Ltd.*, UK. Matlock, pp. 8, [cit.2009-06-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.holroyd-instruments.co.uk/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/paper.pdf>>
- [18] ORHAN, S., AKTÜRK, N., VELIK, V. Vibration Monitoring for Detect Diagnosis of Rolling Elements Bearings as a Predictive Maintenance Tool: Comprehensive Case Studies. *NDT&E International*. Vol. 39, No. 4, 2006, pp. 293-298.
- [19] HENG, R. B. W., NOR, M. J. M. Statistical Analysis of Sound and Vibration Signals for Monitoring Rolling Element Bearing Condition. *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 1-3, January-March 1998, pp. 211-226. ISSN 0003-682X.
- [20] MARTIN, H. R., HONARVAR, F. Application of Statistical Moments to Bearing Failure Detection. *Applied Acoustics*, Vol. 44, No. 1, 1995, pp. 67-77. ISSN 0003-682X.
- [21] VASS, Jiří. Přehled metod detekce mechanického poškození. ČVUT [online]. 2004 [cit. 2011-03-17]. Dostupný z WWW: <http://noel.feld.cvut.cz/sbornik05/data/007_slajdy.pdf>
- [22] ANDERSSON, P. H., RUUSKA, M. Spindle Bearing Monitoring Using Acoustic Emission. *Proceedings of XVII IMEKO World Congress*, Dubrovnik, Croatia, June 22-27, 2003, pp. 2164-2167.
- [23] HENAO-SEPULVEDA, J. A., TOLEDO-QUIONES, M., JIA, Y. Contactless Monitoring of Ball Bearing Temperature, *Instrumentation and Measurement Technology Conference 2005, Proceedings of the IEEE* , Ottawa, Ontario, Canada, Vol.2, 16-19 May 2005, pp. 1571-1573.
- [24] HENAO-SEPULVEDA, J. A., ROBLES-RODRIGUEZ, P. L., TOLEDO-QUIONES, M., JIA, Y. RF-Powered Wireless Sensor Circuits for Temperature Monitoring. *49th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, MWSCAS 2006, San Juan, Marriott Resort & Stellaris Casino, San Juan, Puerto Rico, USA, Vol.2, August 6-9. 2006, pp. 628-631.

- [25] KIM, Y. H., TAN, A.C. C., MATHEW, J., YANG, B. S. Condition Monitoring of Low Speed Bearings: A Comparative Study of the Ultrasound Technique Versus Vibration Measurements. *Engineering Asset Management*, Springer London, 2006, pp. 182-191. ISBN 978-1-84628-814-2.
- [26] 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. *Challenges of Power Engineering and Environment*, Springer Berlin Heidelberg, 2007, Vol. 1, pp. 541-546, ISBN 978-3-540-76694-0 (Online).
- [27] SHIROISHI, J., LI, Y., LIANG, S., KURFESS, T., DANYLUK, S. Bearing Condition Diagnostics via Vibration and Acoustic Emission Measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 5, 1997, pp. 693-705, ISSN 0888-3270.
- [28] SHAO Y., NEZU, F. Bearing Fault Detection Using Laser Displacement Sensor. *SICE '96. Proceedings of the 35th SICE Annual Conference. International Session Papers*, Tottory, July 24-26, 1996, pp. 1069–1072.
- [29] THEOBALD, P., POCKLINGTON, R. Velocity Sensitivity Calibration of AE Sensors Using the Through Wave Method and Laser Interferometry. In *29th European Conference on AE Testing*. první. Videň, TUV Austria. 2010. pp. 7. ISBN 978-3-200-01956-0.
- [30] ZHOU, W., HABETLER, T. G., HARLEY, R. G. Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review. In *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2007*, September 6-8. 2007, pp.3-6, ISBN 978-1-4244-1061-3.
- [31] 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*, ASME, USA, Vol. 130, No. 4, 2008, pp. 14, ISSN 1048-9002.
- [32] ELFORJANI, M., MBA, D. Natural Mechanical Degradation Measurements in Slow Speed Bearings. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 1, January 2009, pp. 521-532, ISSN 1350-6307.
- [33] AL-DOSSARY, S., HAMZAH, R. I. R., MBA, D. Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing. *Applied Acoustics*, Vol. 70, No. 1, January 2009, pp. 58-81, ISSN 0003-682X.
- [34] ROGERS, L. M. Detection of incipient damage in large rolling element bearings. *Advanced Materials Research*, TRANS TECH PUBLICATIONS, SWITZERLAND, Vol. 13-14, 2006, pp. 37–44, ISSN 1662-8985.
- [35] RAHMAN, M. Z., OHBA, H., YAMAMOTO, T., YOSHIOKA, T. A Study on Incipient Damage Monitoring in Rolling Contact Fatigue Process Using Acoustic Emission. *Tribology Transactions*, STLE, JAPAN, 2008, Vol. 51, No. 5, pp. 543–551, ISSN 1040-2004 print /1547-397X online.

- [36] THEOBALD, P., ZEQUIRI, B., AVISON, J. Couplants and Their Influence on AE Sensor Sensitivity. *Journal of Acoustic Emission*, ACOUSTIC EMISSION GROUP, Encino CA, USA, 2008, Vol. 26, pp. 91-97, ISSN 0730-0050.
- [37] COLOMBO, S., GIANNOPOULOS, A., FORDE, M. C., HASSON, Roy., MULHOLLAND, J. Frequency Response of Different Couplant Materials for Mounting Transducers. *NDT & E International, Structural Faults and Repair*, Vol. 38, No. 3, April 2005, pp. 187-193, ISSN 0963-8695.
- [38] FASANA, A., GARIBALDI, L. Measurement of Acoustic Emission Signals: Influence of the Couplant. *Key Engineering Materials*, Vol. 347, 2007, pp. 375 - 380, ISSN 1662-9795.
- [39] Trouble Shooting (Bearing Doctor), NSK Ltd., [online], [cit. 2009-09-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.nsk.com/services/troubleshooting/>>
- [40] BOHÁČEK, F. *Části a mechanismy strojů II, Hřídele, tribologie, ložiska*. 3. vyd. BRNO, PC-DIR spol. s r. o. - Nakladatelství, 1996, ISBN 80-214-0829-4.
- [41] Manuál konstruktéra, ZKL, a. s., [online], [cit. 2009-09-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.zkl.cz/czech/manual.aspx?page=vypocty>>
- [42] 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.
- [43] ČERNÝ, M.; MAZAL, P., FILÍPEK, J. Vliv délky a tvaru vlnovodů na snímání akustického signálu. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2008. 56(1). pp. 43 - 53. ISSN 1211-8516.
- [44] Zajímavosti pro tribotechniky (a nejen pro ně), [online], [cit. 2011-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.tribotechnika.cz/zajimavosti.htm>>

11 PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE – VÝBĚR **11****články v recenzovaných časopisech – domácí**

HORT, F., MAZAL, P. Application of Acoustic Emission for Measuring of Contact Fatigue of Axial Bearing. *Engineering Mechanics*, ENGINEERING ACADEMY OF THE CZECH REPUBLIC, Vol. 18, no. 2, 2011, pp. 1 – 9, ISSN 1802-1484.

HORT, F., MAZAL, P. Application of Acoustic Emission for Monitoring of Bearing Lifetime. *Doprava*, 2011, ISSN: 0012-5520. Accepted to printing

články v recenzovaných časopisech – zahraniční

HORT, F., MAZAL, P., VLAŠIC, F. Monitoring of Acoustic Emission Signal of Loaded Axial Bearings. *Journal of Materials Science and Engineering*, USA, David Publishing, 2011, ISSN 1934-8959.
Accepted to printing (9. - 10. 2011)

MAZAL, P., HORT, F., DRAB, M., SLUNECKO, T. Some Possibilities of AE Signal Treatment at Contact Damage Tests of Materials and Bearings. *Journal of Acoustic Emission*. 2008, 2008 (28)(1), p. 189 - 198, ISSN 0730-0050.

MAZAL, P., HORT, F., VLAŠIC, F. Możliwości oceny stopnia zużycia łożysk metoda emisji akustycznej. *Badania Materialow - Materials Testing*, 2009, 20(8), p. 11 - 17, ISSN 1734-4611.

VLAŠIC, F., MAZAL, P., HORT, F. Comparison of Acoustic Emission Signal and X-Ray Diffraction at Initial Stages of Fatigue Damage. *Journal of Acoustic Emission*. 2010, 28(1), p. 170 - 178, ISSN 0730-0050.

články z konferencí – budou zařazeny v THOMSON REUTERS

MAZAL, P., VLAŠIC, F., HORT, F. Applications of Continuous Sampling of AE Signal for Detection of Fatigue Damage. In *Vth Workshop NDT in Progress*. 2009. Brno, ČNDT. 2009. p. 383 - 390. ISBN 978-80-214-3968-9.

MAZAL, P., HORT, F., VLASIC, F. Acoustic Emission Diagnostics of Roller Bearings Damage. In. *International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures*, NDTMS-2011, Istanbul, Turkey, Springer in RILEM Bookseries, 15-18 May 2011. Accepted to printing.

MAZAL, P., LISKUTIN, P., VLASIC, F., HORT, F., FIALA, J. Usage of Acoustic Emission Signal and X-ray Diffraction Analysis for Detection of Microstructural Changes in Cyclically Loaded AlMg Alloys. In. *International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures*, NDTMS-2011, Istanbul, Turkey, Springer in RILEM Bookseries , 15-18 May 2011. Accepted to printing.

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1:

Metodika identifikace vzniku poškození radiálních ložisek s nastavením řetězce pro společné měření AE, vibrací a teploty

Příloha 2: CD

elektronická verze dizertační práce

Kód.txt

hdrload.m

benchload.m

bench.m

Uživatelské prostředí.pdf

PŘÍLOHA 1

Metodika identifikace vzniku poškození radiálních ložisek s nastavením řetězce pro společné měření AE, vibrací a teploty

1 Příprava experimentu

1.1 Volba typu zkoušky

Na volbě typu zkoušky závisí použití měřicí aparatury a jejího nastavení. Obecně lze rozčlenit zkoušení ložisek na stanicích SA67 do třech typů zkoušek:

- a) Trvanlivostní zkoušky (dlouhodobé).
- b) Zkrácené zkoušky vlivem změny vstupních parametrů.
- c) Zkrácené zkoušky vlivem uměle vytvořeného poškození.

1.2 Volba ložiska

Při volbě ložiska je nutné předem znát možnosti stanice, případně nechat vyrobit vymezovací prvky patřičné pro daný rozměr ložiska. Dále je nutné upravit redukci pro upnutí snímačů s vlnovodem dle velikosti zkoušeného ložiska.

1.3 Příprava ložiska

Před zkouškou je nutné ložisko prohlédnout, jestli nemá zjevnou výrobní vadu. V případě nezakrytovaného ložiska, které nemá vlastní náplň maziva od výrobce, je nutné ložisko vymýt a namazat adekvátním množstvím kvalitního plastického maziva (pro ložiska 6204 je adekvátní množství vyjádřené v hmotnosti cca 3 g). Pro vymytí je možné použít například Technický benzín, či Aceton. Volba maziva je závislá na typu mazání. Při mazání olejovou lázní je pak požadavek kladen na stanovení množství olejové náplně dle hladinoměru.

1.4 Uměle vytvořené poškození ložiska

Vytvoření umělého poškození jako iniciátoru poškození kontaktního (přírozeného) je předmětem zrychlených zkoušek. Poškození je možné vytvořit ještě před zahájením experimentální zkoušky, nebo jak bylo prezentováno v této práci, až po zajetí ložiska, kdy následně vzniká možnost porovnání signálu před a po umělém poškození. Pro zrychlené zkoušky je tedy doporučeno provádět prvně záběh nepoškozeného ložiska. Postup provedení zkoušky je následující:

- a) Nové ložisko vymýt Technickým benzinem, vyfoukat stlačeným vzduchem a namazat definovaným množstvím plastického maziva.
- b) Spustit zkoušku a ponechat 2 – 3 dny pro utvoření stopy.
- c) Zastavit zkoušku, znovu ložisko vymýt, vytvořit poškození – pomocí diamantového brusného tělíska (podélné, nebo příčné vrypy v povrchové vrstvě ložiskové dráhy), nebo vyjiskřením, pokud je k dráze dobrý přístup a nedojde k ovlivnění styku kuliček s kroužky (elektrickým proudem).

Pokud je umělé poškození vytvořeno na vnějším ložiskovém kroužku, který se ve stanici neotáčí, je nutné zvolit polohu tohoto kroužku v *pouzdru*. Volba polohy závisí na požadavku, jak velký tlak má působit na vytvořené poškození. Pro zkoušení je doporučeno volit polohu umělého poškození v nejvyšším bodě *pouzdra pro ložisko* při kompletaci stanice.

1.5 Zatížení zkoušeného ložiska

Velikost zatížení zkoušeného ložiska je závislá na jeho typu a velikosti. Příslušné dynamické maximální zatížení je udáváno výrobcem a lze dohledat v katalozích výrobců. Zvolení velikosti zatížení závisí rovněž na požadované délce zkoušení, pro dlouhodobé zkoušky radiálních ložisek s typovým označením 6204 je dle zkušeností řešitele této práce doporučeno zatížení nepřesahující 3 kN, pro zkrácené zkoušky pak může být voleno až 4,5 kN, vyšší zatížení lze volit při mazání olejovou lázní, kde je zajištěn větší odvod tepla z ložiska. Stanice je standardně vybavena motory s výstupními otáčkami 2845 ot.min⁻¹, což poskytuje dostatečnou rezervu vzhledem k maximálním přípustným otáčkám zkoušených ložisek (6204) uváděných výrobcem.

1.6 Volba snímačů a jejich upevnění

Snímání signálu AE a signálu vibrací je realizováno jak z povrchu ložiska prostřednictvím vlnovodu, tak i z povrchu stanice. Pro vlnovod je volen snímač AE s typovým označením MTPA-15 a jeho upevnění je zajištěno převlečnou maticí. Přitlačení snímače k vlnovodu je postačující volit utažením matice rukou, případně momentovým klíčem. Mezi snímač AE a vlnovod je nutné nanést vhodné vazebné prostředí, doporučené jsou speciální AE pasty, či ultrazvukové gely. Upevnění snímače AE na povrchu stanice je realizováno prostřednictvím kyanoakrylátového lepidla, které má dobré vlastnosti pro přenos signálu AE, nebo prostřednictvím magnetického snímače, opět s vazebným prostředím mezi snímačem a povrchem. Pokud je na povrchu, kde chceme umístit snímač, nanesen povlak (např. barva), je nejprve nutné tento povlak odstranit a místo řádně odmastit.

Snímání vibrací a teploty z ložiska je zajištěno speciálním vlnovodem, který má v čele vlnovodu umístěné teplotní čidlo. Druhý snímač vibrací je upevněn na povrchu prostřednictvím magnetického držáku. Třetím typem snímání (vibrační snímač na vlnovodu) je zajištěn chod stanice a v případě překročení nastavených mezí je stanice vypnuta. Mezi stykové plochy snímačů a vlnovodů je nutné (vždy) aplikovat vazebné prostředí. Podrobný popis stanice a snímačů je uveden v kapitole „EXPERIMENTÁLNÍ APARATURA”.

2 Zkoušení

2.1 Předběžná příprava a nastavení měření AE

Zařízení použité při měření musí být kalibrováno dle EN 13477-2 a výsledky kalibrace musí být zdokumentovány. Po zapojení všech prvků měřicího řetězce přichází ověření detekce signálů – ze snímačů a nastavení prahových hodnot měřených veličin. Detekce signálu souvisí s nastavením celkového zesílení a následně i prahů jednotlivých veličin. Pro ověření detekce signálu je doporučeno použít simulačního zdroje (Hsu-Nielsen-Source). Z provedených experimentálních zkoušek je pro zkoušení radiálních ložisek na stanici SA67 doporučeno následující nastavení citlivosti, viz obr. 5.1 (software DaeMon):

a) Nastavení *Counts*

Nastavení hladiny šumu okolí do oblasti detekce první hladiny *Counts*. Tato mez se stanovuje před zapnutím zkoušky ložiska a je stanovena z důvodů porovnatelnosti hladin signálu šumu a signálu generovaným diagnostikovaným objektem. Mez detekce se nastavuje celkovým zesílením, v potaz je nutné také vzít přítomnost

předzesilovače ve snímači, případně zapojení předzesilovače ke snímači, který ve většině případů dosahuje hodnoty 35 dB.

b) Detekce signálu

Ověření detekce signálu simulačním zdrojem (Hsu-Nielsen-Source), v případě *Counts* by měl být hit signálu AE zaznamenán všemi hladinami.

c) Count a Trendy

Count a *Trendy* se obvykle nastavují kolem hodnot 150 % a 300 %. Je možné rovněž zvolit jiné meze, ale doporučuje se ponechat mezi nimi dvojnásobný rozdíl. Položky intervalu měření a průměrování je vhodné ponechat v základním nastavení.

d) Vzorkování

Doporučené hodnoty *Rychlost*, *Paměť* a *Pretrigger* jsou zvoleny v závislosti na požadované délce a kvalitě vzoru a korespondují s algoritmem pro zpracování navzorkovaných událostí v prostředí *Matlab* (Kód.txt). Periodu je nutné volit s ohledem na předpokládanou délku měření, při dlouhodobých zkouškách je nutné zvolit maximální hodnotu 60 000 ms. Volba, kdy je vzorek navzorkován, závisí na *Nastavení Triggeru*, zde je doporučeno volit *Prahový* a velikost adekvátní s nastavením detekce prahů hitů událostí (Události).

e) Detekce hitu

Parametry určující začátek a konec detekce hitu události AE je možné nastavit na stejnou velikost, přičemž počáteční nastavení se doporučuje v rozmezí od 200 % do 300 % rozsahu a po spuštění zkoušky lze tyto prahy případně zkorigovat, aby nedocházelo k zahlcení, či jejich nedostatečnému počtu.

f) Ukládání

Do volby ukládání je doporučeno zatrhnout všechny sledované parametry AE.

2.2 Předběžná příprava a nastavení měření vibrací a teploty

Pro měření vibrací a teploty je používána aparatura *VibroControl 1500* se snímači *ASC-062/T1/050/0 SN: 900016 (snímač na tělese)* a *ASC-nestandardní SN: 1715*. Snímané parametry jsou zaznamenávány v programu *VibroControl*. Před měřením je nutné spustit aplikaci *VDTControlserver (server)*, která naváže komunikaci s analyzátozem. Přihlašovací údaje je možné nastavit na serveru v záložce *Nastavení – Uživatelé*. Doporučené nastavení je následující: název – *localhost*, adresa – *localhost*, port – 1800, uživatelské jméno – *host* a heslo – *host*. Po spuštění programu *VDTControlcenter* lze přes přihlašovací údaje přejít k nastavení parametrů měření.

a) Nastavení aparatury

Nastavení aparatury a popis jednotlivých položek nastavení je uveden v příloze *Uživatelské prostředí*, která byla vytvořena jako průvodce připojením nastavením a ukázkou vyhodnocení snímaných parametrů pro studenty v rámci řešení projektu FRVŠ č. 1616/2009. Důležitými parametry jsou citlivost snímače přepočtená na použitý snímač (Trimr) a celková citlivost nastavená na co nejnížší rozsah (Rozsah). Vzhledem k tomu, že zkouška je monitorována prostřednictvím kontrolního panelu stanice, je nastavení *Limitů* při těchto zkouškách ponecháno jako informativní.

b) Spuštění měření

Spuštění měření je možné zvolit v sekci: *Nastavení – Měření – Nové*. Parametry pro periody jednotlivých měřených veličin jsou voleny v souvislosti s plánovanou délkou experimentu. Pro sledování hlavních hodnot je doporučeno zadávat minimálně hodnotu 1 minutu a vyšší. Pro záznam analýz vibrací a zrychlení je doporučeno zadávat minimálně 5 minutový interval. Tyto intervaly vycházejí z doby, kterou potřebuje přístroj pro provedení zadaných analýz a automatických trendů. U dlouhodobých zkoušek je doporučeno nastavení *Hlavní hodnoty/Analýzy* na 5/20 (min.) a samozřejmě mohou být i vyšší.

Pro zahájení měření je nutné zvolit časový interval pro měření. Pro kontinuální měření musí být zatrženy všechny dny týdne a nastaven časový interval od 00:00:00 – 23:59:59, jiné nastavení by z důvodu přerušení měření vždy ukončovalo a opět vytvářelo nové složky s *Hlavními hodnotami*.

2.3 Sběr dat a on-line analýza**a) Měření AE: XEDO**

Před zahájením měření je nutné uložit konfiguraci do připraveného adresáře. Označení složky s daty je doporučeno volit jako *rok měsíc den* startu zkoušky (např. 20110726). Adresářovou strukturu a nově vytvořené soubory je dobré zkontrolovat v operačním systému. Před ztrátou dat vlivem náhlých výpadků el. energie, či jiných nepředvídatelných problémů, je žádoucí zvolit ukládání všech naměřených hodnot každou hodinu v nabídce *Pravidlo příponové strategie*. Cesta k nabídce je následující: *Zobrazení – Příponová strategie – Nové*.

b) Měření AE: XEDO + SWITCH + IPL

U rozšířené aparatury je nastavení stejné jako v případě samotného analyzátoru XEDO s rozšířením alarmových podmínek pro spuštění kontinuálního snímání aparaturou IPL. Tyto podmínky je doporučeno volit v závislosti na velikosti parametru RMS. V případě požadavku na záznam celého měření, kdy se jedná o detailní popis záběhu ložiska, nebo zkrácené zkoušky trvající cca jen několik hodin, je možné nastavit parametry RMS pro jednotlivé kanály těsně nad úroveň šumu. Zahájení ukládání tak nastane souběžně se startem zkoušky.

U dlouhodobých zkoušek je nutné zvolit práh tak vysoko, aby spouštěl snímání pouze při náhlých událostech, ve kterých dochází ke zvýšení intenzity signálu. Toto nastavení vychází ze zkušeností obsluhy.

Nastavení konfigurace programu *Dakel UI* je podrobně uvedeno v příslušném manuálu. Jedním ze základních požadavků kladených na kvalitu ukládaného signálu je nastavení zesílení pro jednotlivé kanály stejné, jako je tomu u aparatury XEDO. Tím se docílí možnosti vzájemně výsledky měření porovnávat a ověřovat. Analyzátor IPL je však možné využívat rovněž samostatně.

c) Start zkoušky a analýza snímaných parametrů

Samotné spuštění zkoušky je zahájeno až po volbě ukládání všech měřených parametrů (AE, vibrace a teplota). Zatížení působící na ložisko je doporučeno aktivovat až po roztočení ložiska (startu stanice). V prvních minutách zkoušky je nutné zkontrolovat nastavení zesílení všech měřených parametrů (zvláště u AE). V případě, že je některý parametr příliš utlumen, nebo je naopak signál zahlcen, musí být celkové zesílení signálu, nebo příslušný práh upraveny.

Snímání vibrací a teploty je možné spustit zatržením kolonky *Zapnuto* a potvrzením tlačítka *Uložit změny*. Od tohoto okamžiku probíhá ukládání zvolených parametrů do předem vytvořené složky pod záložkou *Data*.

Kontrolní panel je výhodné nastavit na citlivost 20 dB, aby bylo zaručeno vyvarování se zastavení stanice v případě náhlých výkmitů během rozjezdu.

d) Kontrola snímaných parametrů

Zvláště při dlouhodobých zkouškách je nutné periodicky kontrolovat snímané parametry a stav veškerého měřicího zařízení. V případě výpadků aparatury, či výskytu jiného problému, je nutné případnou část měřicího řetězce obnovit (restart). Periodické kontroly je nutné zaznamenávat buď elektronicky, nebo lépe do spisové podoby. Stejně tak je nutné zaznamenávat zjištěné problémy, nebo změny vstupních parametrů (zatěžující síla, změna mazání apod.) s údajem aktuálního času a celkové doby zkoušky (počítadlo kontrolního panelu).

e) Ukončení zkoušení

Ukončení zkoušky je ovlivněno nastavením citlivosti vibračního snímače od kontrolního panelu. V případě překročení nastavené hodnoty je stanice vypnuta. Stejně tak je stanice vypnuta v případě zvýšené hodnoty teploty nad stanovenou mez. Pokud dojde k samovolnému vypnutí stanice, je nutné prostudovat záznam ze snímaných parametrů a ověřit nárůst signálu, či přítomnost náhlých energetických výkyvů. V případě, že se v záznamu neobjevuje nic výrazného, co by poukazovalo na přítomnost poruchy ložiska, a ani kontrola protočněním ložiska ručně nevykazuje známky poškození, je přistoupeno k opětovnému spuštění a pokračování ve zkoušce. Pokud záznam obsahuje energetický nárůst, případně i zvýšenou teplotu, je přistoupeno k zastavení ukládání snímaných parametrů, demontáži stanice a vyjmutí ložiska.

3 Vyhodnocení naměřených parametrů

Norma ČSN EN 13554 považuje za minimální výsledky zkoušky grafická znázornění: počet nespojitých signálů AE (hitů) v závislosti na čase (případně zatížení), dále zobrazení průběhu energie signálu AE, či jeho amplitudy v závislosti na čase (případně zatížení). Třetím požadavkem je lokalizace v případě, že ji je možné provést. V tomto případě zkoušení ložisek nedovoluje zkušební stanice lokalizaci dle příchodu hitu AE.

3.1 Vyhodnocení parametrů AE

a) Vyhodnocení signálu AE v programu *DaeShow*

Parametry AE, které lze výhodně vyhodnotit v programu *DaeShow*, jsou následující: počet překmitů přes nastavené prahové úrovně *Counts*, energii signálu *RMS* a *Count* (ve dvou hladinách). Dalšími parametry jsou počet a vlastnosti hitů AE (událostí), které lze výhodně filtrovat dle jejich vlastností. Tyto parametry byly důkladně probrány v *experimentu I* a lze je zobrazit jak ve formě histogramu, tak i v součtové křivce.

Analýza signálu ve frekvenční oblasti je v tomto programu značně obtížná a lze zobrazovat pouze jednotlivé události a ty vzájemně porovnávat. Pro výhodnější pohled na delší etapu měření, případně na celou zkoušku byl sepsán algoritmus v prostředí *Matlab*.

b) Export a analýza signálu AE v prostředí Matlab

Program DaeShow umožňuje exportovat data v podobě binárních dat (klávesová zkratka Ctrl + E). V dialogu lze vybrat požadovaná data pro časovou a frekvenční analýzu zaznamenaných hitů AE. Typ souboru je označen příponou *smp* (vzorky). Nastavení pro dělení souboru je ponecháno na *rozdělovat vzorky*. Časový filtr vybírá požadovaný interval (dny a časy). Volbou výstup času *sekundy od filtru* se navzorkované hity vzestupně seřadí (od 0 s) od požadovaného časového filtru. Do výstupu není třeba zadávat žádné další doprovodné údaje, nebo komentáře. Pod položkou *další nastavení* lze volit adresář pro exportovaná data. Defaultně jsou data exportována do kořenového adresáře se zdrojovými daty příslušného měření.

Vyexportovaná data jsou ve formě textových souborů (txt.) a každý jeden soubor obsahuje navzorkovaný hit. Každý vzorek obsahuje informativní část o původu vzorku (čas navzorkování, počet hodnot, spouštěcí trigger atd.) následovanou hodnotami digitalizovaného signálu v mV. Podle zvolené vzorkovací frekvence a celkové doby vzorku (2,5 ms) je počet hodnot každého vzorku 5 000, nebo 10 000.

Pro zpracování digitalizovaného signálu v prostředí Matlab byly vyhledány a upraveny algoritmy obsažené ve třech M-filech (bench, benchload, hdrload). Tyto algoritmy je nutné uložit do adresáře s exportovanými vzorky. Po spuštění software Matlab je pro zpracování výsledků možné využít navržený algoritmus, který je uložen v příloze s názvem *Kód.txt*. Tento okomentovaný postup je možné upravit dle aktuálních požadavků (filtrování množství dat, volba zobrazeného frekvenčního pásma, a jiné).

c) Detailní analýza průběhu vyhodnocených parametrů AE

Po vykreslení průběhů parametrů AE ve formě grafů, následuje detailní analýza signálu. Tato analýza spočívá v porovnávání záznamů z časové i frekvenční oblasti, vyhledávání energetických cyklů (časová oblast) jako indikátorů počátků tvorby poškození a frekvencí, které v průběhu zkoušení měnily svoji intenzitu.

3.2 Vyhodnocení vibrací a teploty

Vyhodnocení záznamu vibrací a teploty je prováděno v programu VibroControl. Pod záložkou *Data* je možné vyhledat záznam *hlavních hodnot* a provedené *analýzy*. *Hlavní hodnoty* zobrazují průběhy měřených vibrací, zrychlení a teploty. Záznam je možné graficky upravovat a popřípadě exportovat do formátu xls. Zaznamenané analýzy vibrací (0 Hz – 1000 Hz) a zrychlení (500 Hz – 5000 Hz) lze libovolně ze záznamu vybírat a současně v jednom grafickém zobrazení porovnávat. U Analýz se zobrazuje pouze 15 nejvyšších spektrálních složek. Export analýz je omezen uložením pouze frekvenčního pásma v aktuálním zobrazeném rozlišení, to znamená, že některé frekvenční složky jsou pohlceny do většího celku a dochází tak ke zkreslení jejich velikosti. Proto je doporučeno ponechat vyhodnocení v rámci originálního software.

4 Analýza poškození

Výsledné poškození ložiska je možné detailněji zkoumat až po jeho demontáži. Prvním krokem je vymytí ložiska např. Technickým benzínem. Před demontáží je nutné vytipovat místa s poškozením vnějšího kroužku (prohlídkou ložiska, případně využít poznatek místa s nejvyšším provozním zatížením). Poté je přistoupeno k rozříznutí vnějšího kroužku a klece. Po další bližší prohlídce kroužků a kuliček

jsou vyznačena místa s možným poškozením a tato místa jsou vyříznuta kvůli následnému zkoumání pod mikroskopem (pouze u vnějšího kroužku). Vyříznutí je třeba dělat v takové vzdálenosti od poškození, aby nedošlo k jeho tepelnému ovlivnění.

Dalším krokem je opětovné vymytí ložiska a prohlídka pod světelným mikroskopem. Pokud jsou nalezena i jiná, než únavová poškození, (viz. *experiment I*) je doporučeno nechat provést detailní bodovou analýzu složení poškozeného povrchu doplněnou snímkem z elektronového mikroskopu.

Výsledné poškození zdokumentované snímkem, případně i analýzami chemického složení je nutné zkompletovat s technickou zprávou, která musí obsahovat hlavní položky zkoušení (datum, typové označení ložiska, druh mazání, zatížení a další požadované údaje). Pod hlavičkou s hl. hodnotami následuje zapsaný průběh zkoušení obsahující všechny změny vstupních parametrů (výpadek, změna zatížení, atd.) a pravidelné kontroly stavu měřicího zařízení s udanou aktuální dobou zkoušky.