

Fakulta strojního inženýrství  
Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

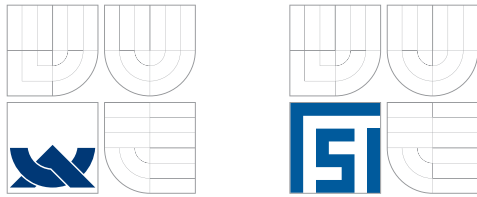
Faculty of Mechanical Engineering  
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Design Theory

# Identifikace změn parametrů signálu akustické emise jako důsledku mechanického poškození konstrukce

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

Autor práce: **Ing. Libor Nohál**  
Author





Fakulta strojního inženýrství  
Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

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

**Identifikace změn parametrů signálu  
akustické emise jako důsledku  
mechanického poškození konstrukce**  
Identification of changes of acoustic emission  
signal parameters as a result of mechanical  
damage of construction

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

Autor práce: **Ing. Libor Nohál**  
Author

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



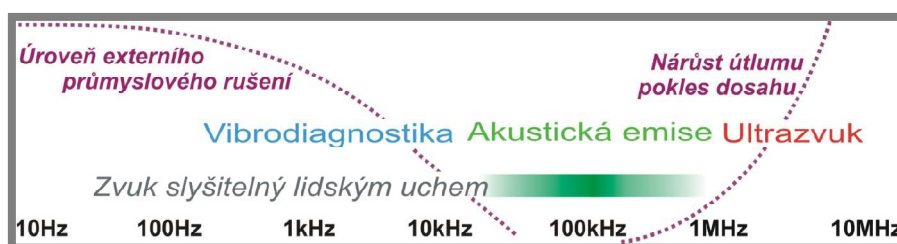
**OBSAH****OBSAH**

<b>ÚVOD</b>	<b>5</b>
<b>1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>7</b>
<b>2 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>9</b>
2.1 Zpracování signálu akustické emise	9
2.2 Zkoušky kontaktní únavy s využitím akustické emise	19
<b>3 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE</b>	<b>28</b>
<b>4 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ</b>	<b>29</b>
<b>5 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>30</b>
5.1 Předběžný výběr parametrů AE	31
5.2 Výsledky předběžných experimentů	31
<b>6 ZÁVĚR</b>	<b>33</b>
<b>7 LITERATURA</b>	<b>34</b>
<b>8 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK</b>	<b>37</b>
<b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>38</b>



## ÚVOD

Pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývá problematikou identifikace parametrů signálu akustické emise (AE) charakterizující mechanické poškození. Metoda akustické emise jako jedna z nejmladších metod nedestruktivního zkoušení nachází uplatnění v širokém spektru aplikací a oborů. Její počátky jsou datovány do padesátých let dvacátého století a jsou spojeny s dizertační prací německého fyzika Josefa Kaisera s názvem *Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*. Největším přínosem Kaiserovy práce je objevení jevu<sup>1</sup> popisující projevy akustické emise v materiálu během mechanického zatěžování [2]. Akustickou emisí<sup>2</sup>, jakožto fyzikální jev, můžeme definovat jako *elastické napěťové vlny generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa, nebo procesem způsobujícím vznik těchto vln* [4]. Díky frekvenčnímu rozsahu akustické emise (1 kHz až 1 MHz), viz obr. 1, jsou částečně eliminovány rušivé zdroje z okolního prostředí a zároveň umožňuje metoda AE detekovat zdroje emise v relativně velké vzdálenosti. Mezi nejrozšířenější oblasti využití metody akustické emise v současnosti patří monitorování stavu konstrukcí nebo strojních celků (součástí); provozní zkoušky tlakových nádob, potrubí a armatur; detekce úniků tlakových systémů, zásobníků a nádrží; monitorování technologických procesů a výzkum únavových procesů v materiálech [2, 3].



Obr. 1 Frekvenční pásmo akustické emise [1]

Mezi hlavní směry v aplikaci této metody na hodnocení mechanického poškození patří detekce defektů a identifikace druhu porušování v různých typech kompozitních materiálů [2, 6] (delaminace, vznik mikrotrhlin v matici, přerušování vláken atd.), hodnocení únavy kovových materiálů [7, 8] a monitorování stavu a detekce vzniku poškození rotačních strojů a jejich součástí [9,10]. Většina poruch kovových strojních součástí (až 90 %) je způsobena únavou materiálu, jenž je důsledkem časově proměnného, ve většině případů kombinovaného zatížení [4]. U kontaktně zatěžovaných součástí (ložiska, ozubené kola, vačky a mnohé další), může dojít k rozvoji únavového poškození a následkem toho ke vzniku pittingu či spallingu vedoucímu až k zadírání součástí. Z tohoto hlediska jsou důležité zkoušky materiálů na kontaktní odolnost, odhalující např. nehomogenitu ložiskových ocelí, která zvyšuje riziko vzniku kontaktní únavy [5]. Při klasických zkouškách je sledována teplota a vibrační zrychlení. Nicméně metoda akustické emise umožňuje včasnější

<sup>1</sup> Kaiserův jev – reprezentuje nevratnost dějů, které jsou zdrojem akustické emise. Pokud namáhání materiálu nedosáhne vyšší hodnoty zatížení než v předcházející historii zatěžování, nedochází k projevům akustické emise.

<sup>2</sup> Akustická emise (AE) × Metoda akustické emise: pojem AE vymezuje fyzikální jev, pojem Metoda AE vymezuje metodu detekce tohoto jevu – metodu NDT.

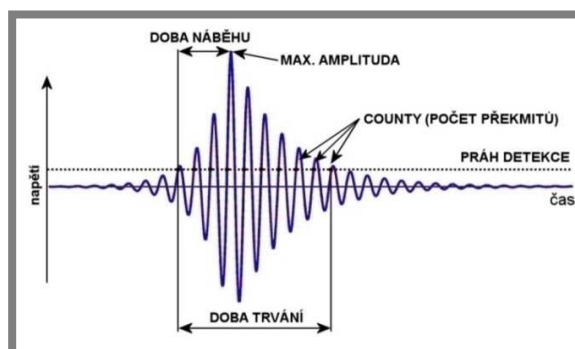
identifikaci poškození a proto se jeví jako perspektivní nástroj pro hodnocení zkoušek ložiskových materiálů, nebo ložisek.

Způsob zpracování signálu AE závisí na charakteru předpokládaného zdroje akustické emise, materiálu, geometrii a způsobu zatěžování součástí. Tyto signály mají stochastický charakter a z tohoto důvodu se velká část analýz zaměřuje na statistické zpracování dat. Dle časového průběhu můžeme rozlišit tři typy signálů AE: praskavý<sup>3</sup>, spojitý, viz obr. 2, a smíšený, který je superpozicí předchozích dvou jmenovaných. Parametry popisující signál akustické emise můžeme rozčlenit na časové, frekvenční (FFT) a časově-frekvenční (STFT, vlnková transformace, atd.).



Obr. 2 Praskavý signál (vlevo) a spojitý signál (vpravo)

Časové parametry se zaměřují na popis tvaru signálu. U praskavého signálu se jedná o parametry popisující jednotlivé hity – max. amplituda, doba trvání, doba náběhu atd., viz obr. 3, nebo parametry z nich odvozené (střední frekvence apod.). U spojitého signálu je vyhodnocována zejména efektivní hodnota signálu – RMS, průměrná hodnota – ASL a absolutní energie signálu.



Obr. 3 Základní parametry hitu

Nejrozšířenějším způsobem identifikace zdrojů AE je parametrická analýza využívající zmíněné časové parametry. Nicméně tento způsob vyhodnocování mnohdy nepřináší dostatečně přesné informace pro detekci počátečního poškození. Jednou z oblastí, která není dosud dostatečně popsána, je hodnocení kontaktního poškození, jež hraje důležitou úlohu v predikci poruch strojů. Výzkumem dějů v oblasti kontaktní únavy se po řadu let také zabývají v laboratořích Ústavu konstruování. Vzhledem k řešeným projektům je tato práce zacílena na identifikaci parametrů akustické emise pro hodnocení vzniku a rozvoje přirozeného poškození kontaktně zatěžovaných součástí. V pojednání je dále vymezena řešená problematika, rozbor současného stavu poznání a jsou definovány předběžné cíle práce.

<sup>3</sup> Praskavý signál – termín užívaný autorem v této práci. Anglický termín – burst signal, dle platné normy ČSN EN 1330-9 český ekvivalent – nespojitý signál (burst).

## 1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

1

Moderní metody nedestruktivního zkoušení mají důležité místo v managementu kvality průmyslové výroby a monitorování stavu strojních součástí a konstrukcí. V současné době se výzkum a studium identifikace kontaktního poškození pomocí metody akustické emise (nalezení vhodných parametrů AE) zaměřuje především na převodovky, respektive ozubené převody, ložiska a zkoušky kontaktní únavy materiálů.

Detekce kontaktního poškození v ozubených převodech se zdá být zatím problematická. Bylo publikováno několik prací zabývajících se možnostmi identifikace poškození akustickou emisí na jednoduchých převodech s přímým [11, 12] nebo šikmým ozubením [13]. Tyto práce analyzovaly vliv provozních parametrů, umělého či přirozeného poškození (pittingu) záběrových ploch zubů kol na signál AE. Závěry prací lze shrnout takto:

- ❖ zdrojem AE byly nerovnosti v kontaktu, detekovatelné pomocí energie a RMS signálu AE, po zahlazení defektu nedetekovatelné;
- ❖ aplikace vlnkové transformace v analýze signálu zlepšila schopnost detekce poškození;
- ❖ spektrální koeficient špičatosti (SK) nepřinesl výhodu v detekci poškození oproti aplikaci ve vibrodiagnostice.

Výsledky prezentované v této oblasti nemají jednoznačný charakter a mnohdy jsou protichůdné. Zdroj emise je ovlivněn mnoha faktory (teplota, parametry maziva, zatížení apod.).

Další oblastí je identifikace kontaktního poškození u ložisek a zkoušek kontaktní únavy materiálů. Metoda AE je schopna detekovat poškození jak u radiálních, tak axiálních ložisek. Zkušební stanice axiálních ložisek lze použít i pro zkoušky materiálů využívající vzorky diskového tvaru. Výhodou tohoto uspořádání stanice je možnost umístit snímač AE co nejbližší zdroji emise. Cílem výzkumu je detekovat poškození v počátečním stádiu, z tohoto důvodu se výzkum zaměřuje v oblasti detekce a identifikace mechanického poškození akustickou emisí zejména na nalezení vhodných parametrů AE pro nejefektivnější způsob vyhodnocování. V současné době je potřeba pro správné vyhodnocení naměřených dat akustické emise vysoce kvalifikovaného a zkušeného pracovníka. Charakter signálu nesoucí informaci o jeho zdroji je závislý na mnoha veličinách, proto neexistuje žádný univerzální algoritmus zpracování surového signálu AE. Je tedy snaha nalézt algoritmus pro zpřesnění analýzy a vyhodnocení dat specifikovaného pro konkrétní aplikaci.

S rozvojem výpočetní techniky dochází k přenesení pokročilých metod zpracování a analýzy signálu používaných ve vibrodiagnostice na metodu AE. Kromě parametrické analýzy, zmíněné v úvodu, je vhodné kvůli stochastickému charakteru signálu pro analýzu využít parametry jako činitel výkmitu, činitel špičatosti, spektrální koeficient špičatosti apod. Frekvenční charakteristiky signálu získané rychlou Fourierovou transformací (FFT) nám dávají přehled o obsahu analyzovaného

signálu, nicméně přicházíme o informaci jeho výskytu v čase. Vzhledem k tomu, že signály AE jsou stochastické, je vhodné analyzovat časově-frekvenční charakteristiky signálu pomocí některé z mnoha metod – krátkodobé Fourierovy transformace (STFT), vlnkové transformace apod.

Téma dizertační práce je zaměřeno na možnost identifikace parametrů AE reagujících na počáteční kontaktní poškození. Pro oblast kontaktní únavy materiálu nebyla zatím jednoznačně stanovena metodika vyhodnocování, či algoritmus umožňující detekci počátečního poškození akustickou emisí v závislosti na konkrétním materiálu. Předběžným cílem dizertační práce je identifikovat parametry AE nejlépe popisující projevy kontaktní únavy a stanovit algoritmus vyhodnocení pro vybrané typy materiálů. Výsledky práce doplní projekt vývoje zařízení nové generace pro diagnostiku kontaktní degradace, řešený na našem pracovišti. Přínos pro tento projekt bude zejména ve zpřesněné identifikaci a ověřené metodice vyhodnocování signálu AE na různých materiálech.

## 2 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V této kapitole je shrnuta problematika vyhodnocování signálu AE, jehož zdrojem je iniciace a rozvoj kontaktní únavy. Struktura kapitoly je členěna následovně:

### 2.1 Zpracování signálu akustické emise

Tato část popisuje pokročilé metody zpracování signálu, jejichž účelem je extrakce parametrů popisujících proces únavového poškození, nebo snížení úrovně zašumění signálu AE.

### 2.2 Zkoušky kontaktní únavy s využitím akustické emise

Zde jsou popsány aplikace metody akustické emise v hodnocení kontaktního poškození materiálu s důrazem na popis projevů jednotlivých parametrů akustické emise.

Únavové procesy jsou největší příčinou poruch kovových strojních součástí a mezi tyto procesy můžeme řadit i kontaktní únavu, v jejímž důsledku může nastat mezní stav poškození tělesa. První prací zabývající se možností identifikace přirozeného vývoje kontaktního poškození metodou AE je práce **Yoshioky a Fujiwary**. [14]. V této práci je porovnávána metoda AE a vibrační zrychlení a konstatováno, že signál AE detekoval kontaktní poškození dříve. Identifikovali časovou četnost překmitů jakožto parametr AE výrazně reagující na poškození. **Choudhury a Tandon** [15] metodu AE aplikovali na zkoušky valivých ložisek se simulovaným defektem. Identifikovali počet překmitů a maximální amplitudu jako vhodný parametr pro hodnocení poškození povrchu valivé dráhy ložisek. Další práce studovali vliv jednotlivých operačních faktorů [16], jako jsou rychlost, krouticí moment, specifická tloušťka mazacího filmu aj., na charakteristiky signálu akustické emise nebo vliv velikosti defektu na parametry signálu [17]. **Yoshioka** ve své další práci [18] prováděl zkoušky modifikovaných axiálních ložisek. Pro zrychlení iniciace a propagace únavového poškození vzorek ložiska obsahuje pouze tři valivé elementy (kuličky) a zároveň byl jeden ložiskový kroužek nahrazen plochým kroužkem. Na jeho práci navázal **Elforjani** [19, 20], který pro zkoušky použil již standardní axiální ložisko, u kterého byl také jeden kroužek nahrazen plochým kroužkem.

### 2.1 Zpracování signálu akustické emise

#### **ELFORJANI, M. AND MBA, D.**

Detecting the onset, propagation and location of non-artificial defects in a slow rotating thrust bearing with acoustic emission. *Insight*, May 2008, vol. 50, no. 5, p. 264-268. [19]

#### **ELFORJANI, M. AND MBA, D.**

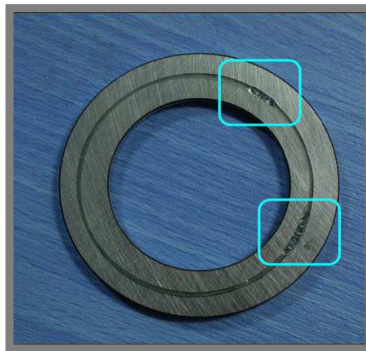
Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with Acoustic Emission. *Engineering Fracture Mechanics*, Jan 2010, vol. 77, no. 1, p. 112-127. [20]

Tyto práce se zabývají studiem využití metody akustické emise pro detekci a lokalizaci přirozeně iniciovaných defektů v ložiskových materiálech. Kromě standardních parametrů AE je využito pro detekci informační entropie, špičatosti a činitele výkyvu. Jako komparační hodnoty bylo použito měření vibrací a teploty.

Experimenty byly cíleny na identifikaci vzniku a následného šíření podpovrchových mikrotrhin vedoucích ke vzniku povrchových defektů v místě kontaktu a identifikaci vhodných parametrů AE a nástrojů pro jejich detekci.

## Experiment

Ke zkoušce bylo použito ložiskového kroužku axiálního kuličkového ložiska (SKF 51210) a jeho valivých elementů s klecí. Druhý kroužek kuličkového ložiska byl nahrazen plochým kroužkem axiálního válečkového ložiska (SKF 81210 TN), který posloužil jako vzorek materiálu, viz obr. 2.1.



Obr. 2.1 Zkoušený vzorek [20]

V měřícím uzlu byly použity čtyři snímače akustické emise (PICO) s operačním rozsahem 200-750 kHz a dva termočlánky (RoHS typ: Jx1 M 455-4371) přilepené na zadní straně plochého kroužku. Jeden akcelerometr připevněný na speciální pouzdro měřil zrychlení v axiálním směru. Snímače akustické emise byly připojeny do měřícího uzlu přes předzesilovače se zesílením 40 dB. Analyzátor AE zaznamenával události vzorkovacích frekvencí 2 MHz a ostatní parametry – časová četnost překmitů, RMS, ASL, maximální amplituda a absolutní energie – s konstantní periodou 10 ms a vzorkovací frekvencí 100 Hz.

ASL byla vypočítávána průběžně s efektivní hodnoty signálu:

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

Pozn.: RMS [mV/100]

$$RMS^2 = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_i}^{t_i+\Delta T} u^2(t) dt \quad (2)$$

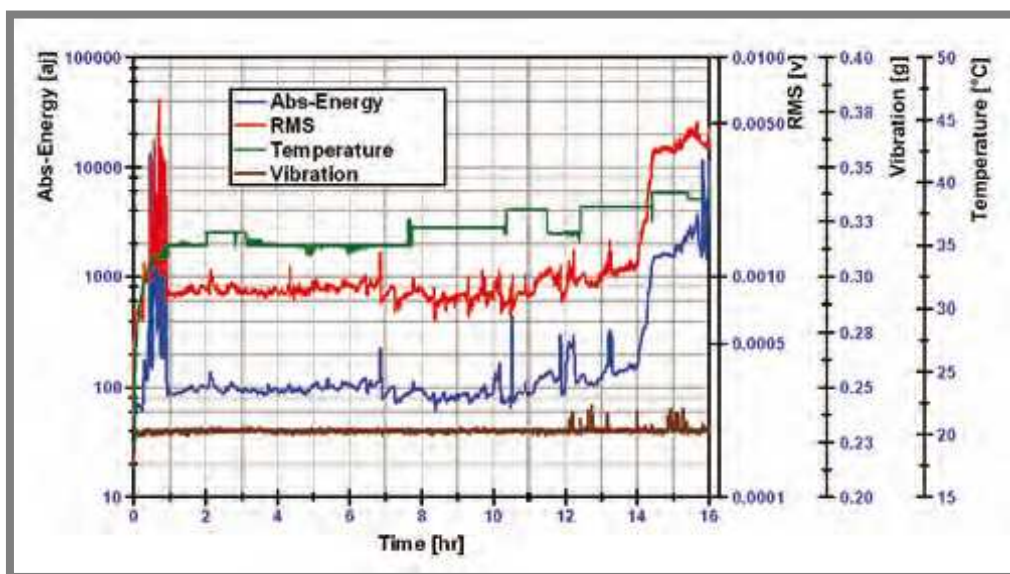
kde kvadrát hodnoty RMS reprezentující výkon signálu je definován jako integrál v časovém intervalu  $\Delta T$ , úrovně signálu  $u(t)$ , lomeno časem  $\Delta T$ ;  $t_i$  je čas počátku události.

### Podmínky experimentu:

Ve studii [19]: otáčky:  $72 \text{ min}^{-1}$ ; zatížení: 50 000 N;  
ve studii [20]: otáčky:  $72 \text{ min}^{-1}$ ; zatížení: 35 000 N.

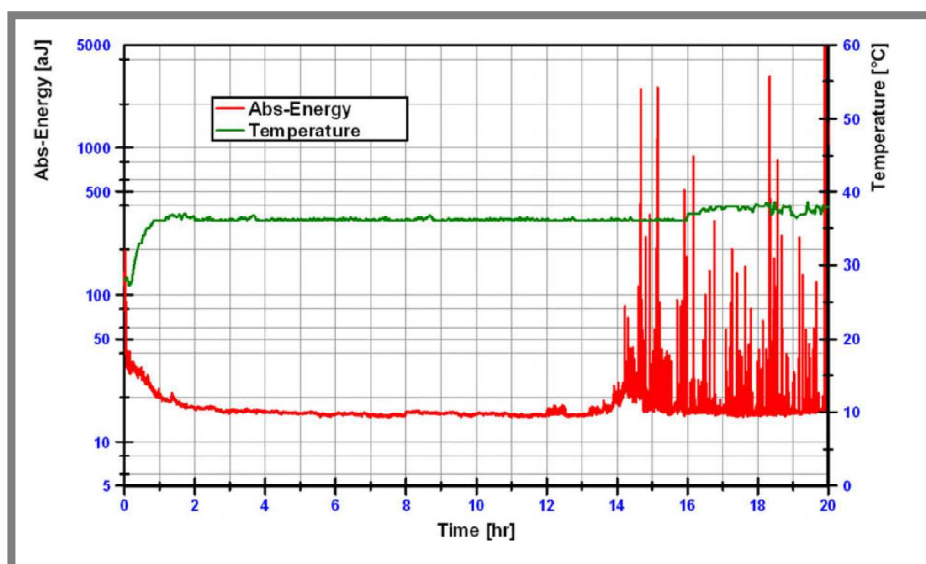
## Výsledky

Ze záznamu zkoušky na obr. 2.2 můžeme konstatovat, že během první hodiny dochází k navýšení energetických parametrů AE (RMS, absolutní energie) což je přisuzováno záběhu. Vibrace tuto změnu vůbec nezaregistrovaly. Od desáté hodiny dochází k pozvolnému nárůstu parametrů AE a od 14 hodiny k rapidnímu zvýšení energetických hladin.



Obr. 2.2 Porovnání parametrů AE, teploty a vibrací [19]

Na obrázku 2.3 je charakteristika teploty a absolutní energie AE ze zkoušky dalšího vzorku.



Obr. 2.3 Záznam zkoušky do výskytu poškození detekovatelného vizuálně [20]

Jako další parametry popisu AE jsou použity informační entropie – IE (3), špičatost – KU (4) a činitel výkyvu – CF (5), definované následujícími rovnicemi:

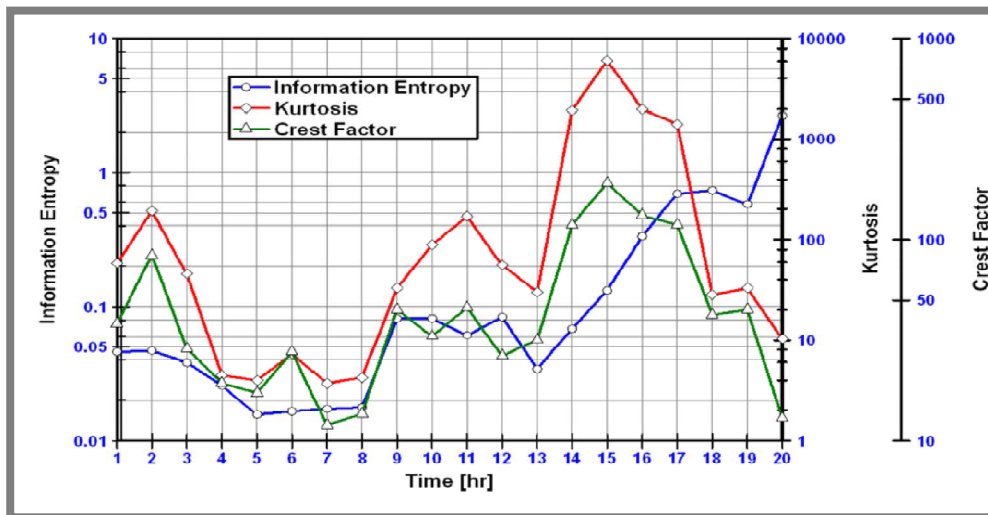
$$IE = \sum_{i=1}^N P_i \times \log(P_i) \quad (3)$$

$$KU = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^4 \quad (4)$$

$$CF = \frac{P}{RMS} \quad (5)$$

kde

$P_i$  – rozdělení pravděpodobnosti;  $X_i$  – amplituda signálu;  $\mu$  – střední hodnota signálu;  $\sigma$  – směrodatná odchylka signálu;  $P$  – absolutní špičková hodnota signálu.



Obr. 2.4 Výsledky informační entropie, špičatosti a činitele výkyvu [20]

## Zhodnocení

Jako nejcitlivější parametry pro detekci byly stanoveny RMS, případně absolutní energie, jejichž průběh je téměř totožný. V druhé studii [20] bylo užito k identifikaci poškození tří parametrů: informační entropie, špičatosti a činitele výkyvu. Špičatost a činitel výkyvu se projeví jako dobré identifikátory počátku poškození, nicméně v závěru zkoušky došlo k rapidnímu poklesu jejich hodnot. Proto můžeme označit IE jako vhodný identifikátor pro rychlé přechodné děje typické pro přirozený rozvoj kontaktního poškození. Studie opět potvrdili předpoklad, že AE je citlivější než vibrační zrychlení. Experimentální zařízení použité ve studiích morfologií odpovídá zkušební stanici AXMAT. Zkouška byla provedena pro velmi nízké otáčky.

**EFTEKHARNEJAD, B., CARRASCO, M. R., CHARNLEY, B. AND MBA, D.** The application of spectral kurtosis on Acoustic Emission and vibrations from a defective bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Jan 2011, vol. 25, no. 1, p. 266-284. [21]

Tento článek se zabývá aplikací spektrálního koeficientu špičatosti (SK) a kurtogramu na odhad filtru využitého pro filtraci signálu AE. Cílem je zlepšení citlivosti detekce vzniku a rozvoje kontaktního poškození. Je srovnávána schopnost identifikace poškození v signálu AE se souběžně nasnímaným signálem vibrací.

### Experiment a zpracování signálu

Vzorek, zkušební stanice a aparatura akustické emise je stejná jako v předchozích pracích [19, 20]. Parametry zkoušky: otáčky: 1500 min<sup>-1</sup>; zatížení: 50 000 N. Byly provedeny dvě zkoušky se stejnými provozními parametry. V druhé zkoušce byl záznam AE i vibrací více zašuměn, což bylo způsobeno zásahem do sestavy zkušební stanice (oblast upevnění vzorku). Kontinuálně sledovaným parametrem AE byla efektivní hodnota signálu.

Pro detailní analýzu bylo rovnoměrně ze všech stádií únavového procesu (délky zkoušky) vybráno šest vzorků signálu AE o délce 0,25 s. V posledním vzorku signálu první zkoušky byl jasně identifikovatelný praskavý signál, což je příznak výskytu pittingu.

Byla provedena obálková analýza využívající Hilbertovu transformaci a detekována frekvence defektu 175 Hz, jenž odpovídá vypočtené hodnotě dle rovnice (6):

$$\text{BPF} = \frac{1}{120} nN \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (6)$$

kde

d – průměr kuličky;

D – roztečný průměr;

$\alpha$  – kontaktní úhel;

n – otáčky; N – počet kuliček.

Vzorky signálů byly následně filtrovány těmito metodami:

- ❖ pásmovou propustí;

pro odhad parametrů (střední frekvence, šířka okna) pro jednotlivé vzorky byla použita metoda založená na spektrálním koeficientu špičatosti – kurtogram;

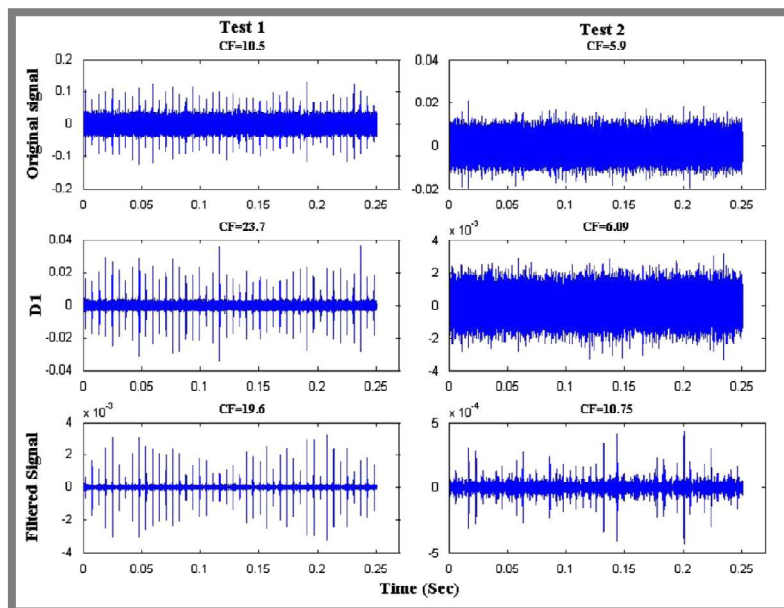
- ❖ vlnkovou transformací.

Byla zvolena kvůli ortogonálnímu tvaru a tvarové podobnosti se signálem generovaným mechanickým poškozením mateřská vlnka Debauches 8. řádu (db8).

Obálková analýza každé dekompozice (D1-9) byla prostudována a jako optimální, vzhledem k detekci přítomnosti defektu, byla identifikována D1 (500-1000 kHz).

### Závěr

Původní signál, filtrovaný signál a dekompozice D1 jsou vzájemně porovnávány pomocí hodnoty činitele výkyvu (CF). Při srovnání s původním signálem byl nárůst CF v případě filtrace využívající SK přibližně 242 % a 95 % (zkouška 1 a zkouška 2). V případě dekompozice vlnkovou transformací 18 % a 70 %. Bylo konstatováno, že nejvíce patrné příznaky defektu v signálu byly v signálech filtrovaných pásmovou propustí.



Obr. 2.5 Porovnání výsledků filtrace signálu [21]

### Zhodnocení

Článek přináší nové poznatky z filtrace signálu využívající filtr navržený pomocí spektrálního koeficientu špičatosti. A porovnání kvality filtrace šumu s využitím vlnkové transformace. Zároveň také verifikuje poznatky Elforjaniho práce [19, 20] pro oblast vyšších otáček ( $1500 \text{ min}^{-1}$ ).

**HE, Y. Y., ZHANG, X. M. AND FRISWELL, M. I.**

Observation of time-frequency characteristics of the acoustic emission from defects in rolling element bearings. *Insight*, Aug 2010, vol. 52, no. 8, p. 412-418 [22]

V tomto článku je prezentováno využití metod vlnové analýzy pro zjištění časově-frekvenčních charakteristik signálu akustické emise generovaného z poškození na elementu valivého ložiska. To zahrnuje analýzu složení signálu, mechanismu vzniku vady a vlivu provozních podmínek.

Parametrická analýza signálu AE nepodává komplexní informaci a často je závislá na zkušenostech pracovníka – nastavení detekčního prahu časové četnosti překmitů apod. Rychlá Fourierova analýza napomáhá charakterizovat signál ve frekvenční oblasti, ale vzhledem k tomu, že signály generované poškozením v ložiscích jsou nestacionární, je vhodnější zvolit časově-frekvenční analýzu. K tomuto účelu lze použít buď krátkodobou Fourierovu transformaci (STFT) nebo vlnkovou transformaci. Vlnková transformace vykazuje lepší časově-frekvenční charakteristiky a z tohoto důvodu se zdá být výhodnější.

Pro kvalitativní analýzu byla užita spojitá vlnková transformace definovaná vztahem (7):

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (7)$$

kde  $a$  je měřítko (dilatace) vlnky;  $b$  je časový posun vlnky;  $\psi$  je tzv. mateřská vlnka.

Z předchozí studie autora bylo určeno, že ideální mateřskou vlnkou pro analýzu signálu AE generovaného z poškození v ložisku je Morletova vlnka.

A pro kvantitativní analýzu byla použita diskretní vlnková transformace (DWT) s využitím mateřské vlnky db10. Z předchozí analýzy (CWT) bylo zjištěno, že energie signálu je většinou rozložena v rozsahu 40 až 250 kHz, viz obr. 2.6. Dekompoziční úroveň byla nastavena na hodnotu 4, což pokrylo frekvenční rozsah 15,63 kHz až 250 kHz.

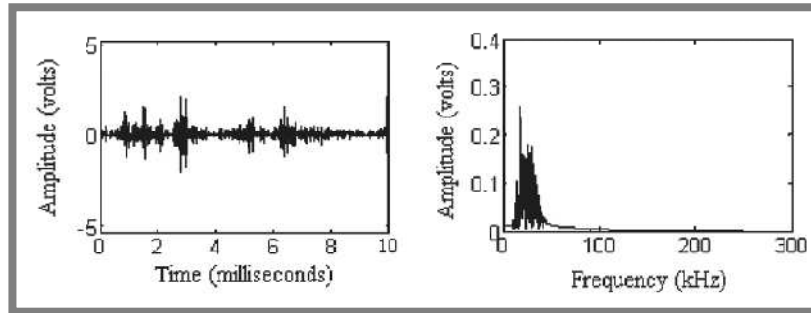
**Experiment**

V experimentu bylo použito radiální kuličkové ložisko typu 6220 a následující podmínky zkoušek:

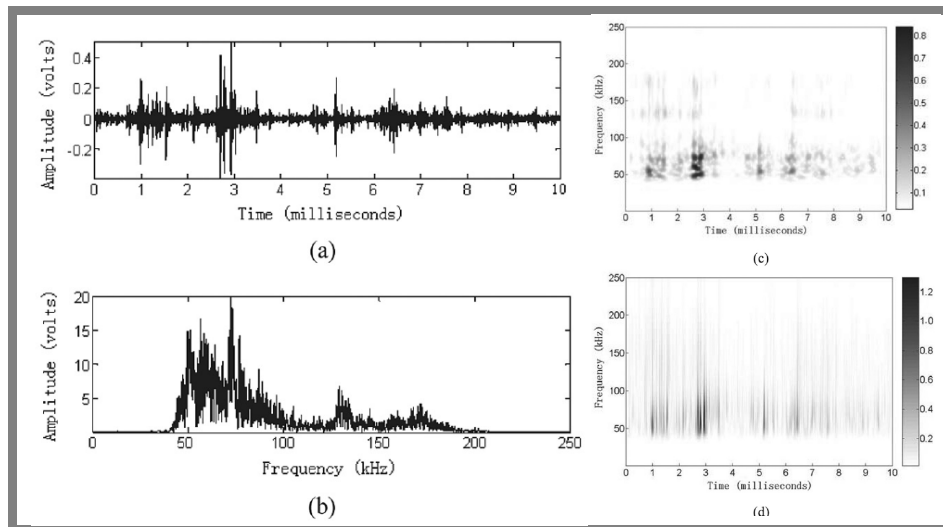
zatížení L1 = 3 kN, L2 = 7 kN;

otáčky S1 = 222 min<sup>-1</sup>, S2 = 444 min<sup>-1</sup>;

na valivé dráze vnějšího kroužku vytvořeno poškození elektrojiskrovou erozí simulující pitting o velikosti D1 = 3 mm a D2 = 5 mm.



Obr. 2.6 Detail d4 DWT ze signálu AE podmínky zkoušky (L1, S1, D1) [22]



Obr. 2.7 Analýza akustické emise za podmínek (L1, S1, D1) a) původní signál AE; b) FFT spektrum; c) škálogram bez optimalizace; d) škálogram s optimalizací [22]

## Závěr

Byl zjišťován vliv provozních podmínek – radiální zatížení, otáčky a velikost defektu – na charakter signálu akustické emise a výsledky poukazují na to, že:

- ❖ signál z defektu se skládal se série praskavých signálů AE;
- ❖ energie byla koncentrována v rozsahu 40 kHz až 100 kHz;
- ❖ konstantní radiální zatížení mělo malý vliv na mechanismus vzniku AE (zvýšení amplitudy);
- ❖ otáčky měly zásadní vliv na mechanismus vzniku AE (změna frekvencí a intenzity);
- ❖ velikost defektu neměla vliv na mechanismus vzniku AE, pouze měnila prostředí vzniku a tím časové trvání energie AE.

Kvantitativní studie ukázala, že se zvyšující se silou, otáčkami nebo velikostí defektu dochází k přesunu energie AE v rozsahu (62,5 až 125) kHz. To naznačuje, že signál AE pocházející z defektu je složen z částí s frekvencemi v tomto rozsahu.

## Zhodnocení

Časově-frekvenční analýza se jeví jako vhodný nástroj pro analýzu nestacionárních dějů typických pro vznik a rozvoj kontaktního poškození. Zejména využití vlnkové transformace, při aplikaci mateřské vlnky typu Morlet nebo některé z rodiny vlnek Daubechies (zde db10).

### **AL-BALUSHI, K. R., ADDALI, A., CHARNLEY, B. AND MBA, D.**

Energy Index technique for detection of Acoustic Emissions associated with incipient bearing failures. *Applied Acoustics*, Sep 2010, vol. 71, no. 9, p. 812-821. [23]

### **AL-BALUSHI K. R., SAMANTA B.**

Gear fault diagnosis using energy-based features of acoustic emission signals. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2002;216(3):249-63. [24]

V tomto článku je prezentována metoda energetického indexu (EI) jako nástroje pro detekci skrytých praskavých signálů AE v šumovém pozadí. Ve studii bylo použito jak experimentálně získaného, tak simulovaného signálu AE s minimální hodnotou odstupů od šumu  $SNR = 0,25$ . Článek navazuje na předchozí práci Al-Balushiho a Santany [24], zabývající se aplikací metody energetického indexu na diagnostiku poškození převodů ozubenými koly. Zde byla prokázána schopnost EI detekovat poškození ozubení v dřívějším stádiu.

Energetický index je definován následující rovnicí:

$$EI = \left( \frac{RMS_{segment}}{RMS_{total}} \right)^N \quad (8)$$

Z rovnice (8) vyplývá, že metoda energetického indexu je založena na porovnání efektivní hodnoty signálu části vzorku a celého vzorku. Pro nízké hodnoty SNR může být EI umocněn mocnitelem  $N$  (se zvyšujícím se umocněním jsou zesilovány hodnoty RMS segmentů nad celkovou hodnotou RMS a hodnoty RMS pod touto hodnotou jsou zeslabovány). Byly provedeny analýzy simulovaných vzorků signálu vytvořené smícháním praskavých signálů a šumu o amplitudě 2 V, odstup od šumu výsledných signálů byl následující  $SNR = 1,0; 0,75; 0,6; 0,5; 0,35$  a  $0,25$ . Výsledek analýzy potvrdil schopnost detekovat praskavý signál v zašuměném signálu až do hodnoty odstupů od šumu  $SNR = 0,35$ . Při hodnotě  $SNR = 0,25$  bylo pozorováno ovlivnění vnějšími vlivy (šum).

## Experiment

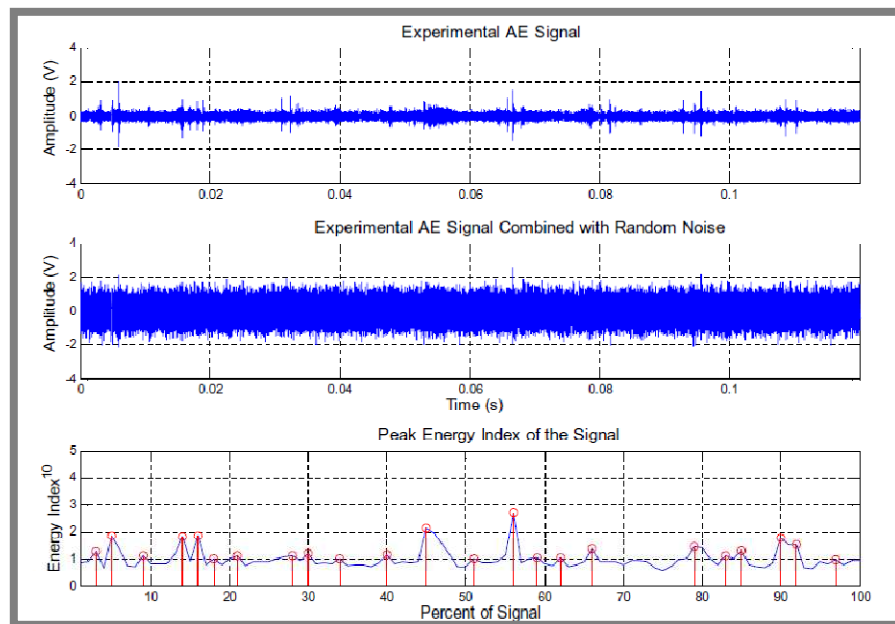
Experimentální data byla získána ze zkoušky radiálního děleného jehlového ložiska (Cooper 01B40MEX) s vytvořeným umělým poškozením o velikosti cca  $0,7 \text{ mm}^2$ . Otáčky v experimentu byly stanoveny na 1000, 2000 a  $3000 \text{ min}^{-1}$  se zatížením 8,9 kN.

Vzorkování signálu bylo 2 MHz, počet navzorkovaných bodů v analyzovaném souboru byl 256 000, signál následně zkrácen na 240 000 bodů reprezentující dvě

otáčky hřídele. Všechny naměřené signály byly normalizovány na maximální hodnotu amplitudy 2 V a smíchány s náhodným šumem s maximální amplitudou 2 V (SNR = 1). Energetický index umocněn deseti a detekční práh byl nastaven na hodnotu 1,0.

### Závěr

- ❖ Metoda energetického indexu je schopna detekovat praskavý signál v zašuměném signálu s SNR větším jak 0,25;
- ❖ snižuje šanci falešné detekce způsobené např. elektronickými zdroji;
- ❖ signál musí být rozčleněn do segmentů dle charakteristiky zkoušené komponenty (počet zubů ozubeného kola, procenta otáčení apod.)
- ❖ při použití značkovače fáze lze lokalizovat defekt,
- ❖ vhodný k analýze zašuměných signálů, kde frekvence užitečného signálu je podobná frekvenci okolního šumu.



Obr. 2.8 EI ze signálu akustické emise s náhodným šumem;  $L = 8,9 \text{ kN}$ ,  $S = 1000 \text{ min}^{-1}$  [23]

### Zhodnocení

Výhodou této metody zpracování signálu, oproti existujícím statistickým metodám jako je např. špičatost je možnost lokalizace špičkové hodnoty signálu v čase. Špičatost nám umožní získat tuto informaci pouze pro celý záznam, jako jednu hodnotu. Z hlediska dizertační práce lze tuto metodu využít k zvýraznění praskavého signálu generovaného pittingem v zašuměném signálu a lokalizovat tak jeho přítomnost.

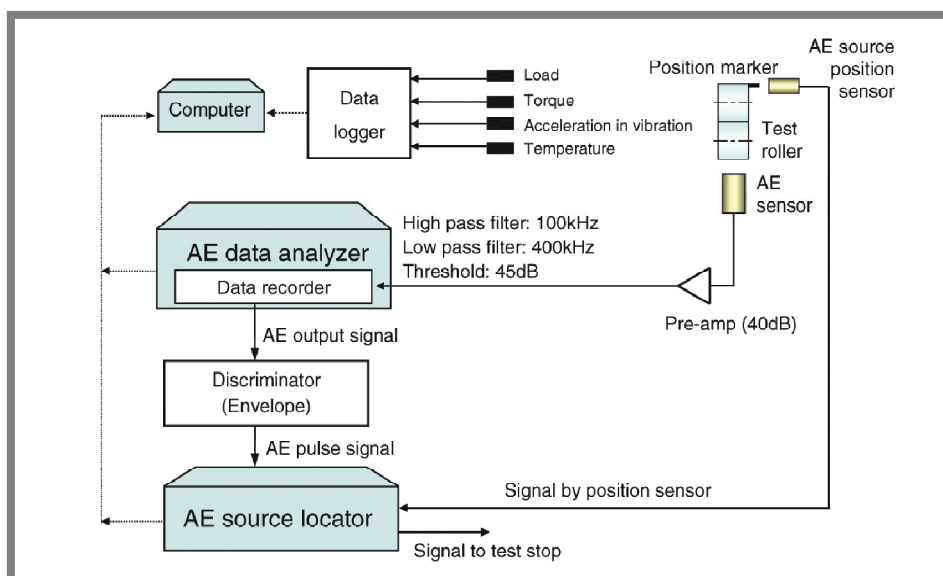
## 2.2 Zkoušky kontaktní únavy s využitím akustické emise

**RAHMAN Z., OHBA H., YAMAMOTO T. AND YOSHIOKA T.**

A Study on Incipient Damage Monitoring in Rolling Contact Fatigue Process Using Acoustic Emission, *Tribology Transactions*, 2008, 51:5, 543-551. [25]

Tento článek se zabývá identifikací počáteční fáze kontaktního poškození materiálu a jeho lokalizací využitím metody akustické emise. Pro experiment bylo využito zkušební zařízení sestávající se ze dvou radiálně zatížených kotoučů. Zkouška probíhala při konstantní rychlosti otáčení a neproměnném zatížení.

Hnací kotouč měl stykovou plochu zakřivenou poloměrem R15 a byl vyroben z kalené nízkolegované oceli SNCM420. Hnaný kotouč měl tvar válce a jako materiál byla použita indukčně kalená ocel S40C (ekvivalent ČSN 41 2041). Počáteční drsnost povrchu obou kotoučů byla v rozmezí Rz 1,0÷2,0 mm. Celá měřicí soustava se sestávala ze snímače zatížení, snímače krouticího momentu, vibračních akcelerometrů, snímače teploty oleje, snímače otáček, snímače akustické emise a snímače pro lokalizaci AE. Snímač pro lokalizaci identifikuje polohu kotouče, který je pro tento účel rozčleněn na 100 úseků.



Obr. 2.9 Schematický diagram systému zpracování dat [25]

### Experiment

Zatížení bylo realizováno pružinovým zatěžovacím systémem a bylo předpokládáno normální rozložení Hertzova tlaku s maximální hodnotou 4 GPa. Zkouška proběhla v podmínkách bodového kontaktu s otáčkami hnacího kotouče  $800 \text{ min}^{-1}$  a poměrem prokluzu kolem 9 % určené převodem. Místo kontaktu bylo mazáno převodovým olejem API GL-5 (viskozita  $178 \text{ mm}^2/\text{s}$  při  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $17 \text{ mm}^2/\text{s}$  při  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , hustota  $0,887 \text{ g/cm}^3$ ). Jako podmínka ukončení zkoušky byla stanovena hraniční hodnota časové četnosti překmitů přes stanovený detekční práh – 15 překmitů za 2 min.

Signál akustické emise byl vzorkován frekvencí 2 MHz, byla použita horní propust 100 kHz, dolní propust 400 kHz, zesílení předzesilovače 40 dB a nastavení detekčního prahu na 45 dB.

Záznam zkoušky, na obrázku 2.10, zobrazuje průběh časové četnosti překmitů a vibračního signálu (vibračního zrychlení) v závislosti na čase. Na obrázku jsou dále znázorněny tři stádia zkoušky kontaktní únavy (značeny 1 až 3).

Stádia kontaktní únavy v obr. 2.10:

Stádium 1:

jedná se o záběhový stav, kdy dochází k rychlému nárůstu časové četnosti překmitů vlivem zvýšené počáteční drsnosti stykových ploch a plastické deformaci obou kotoučů v místě kontaktu. Tento stav odpovídá přibližně 30 % trvání zkoušky (tj.  $N = 1,3 \times 10^6$  cyklů). První stádium končí náhlým poklesem známým jako jev „uzdravování“ („healing“). Tento jev je projevem zahlazování původních nerovností (drsnosti) povrchu v důsledku plastické deformace anebo opotřebení, jenž je způsoben interakcí v místě valivého kontaktu.

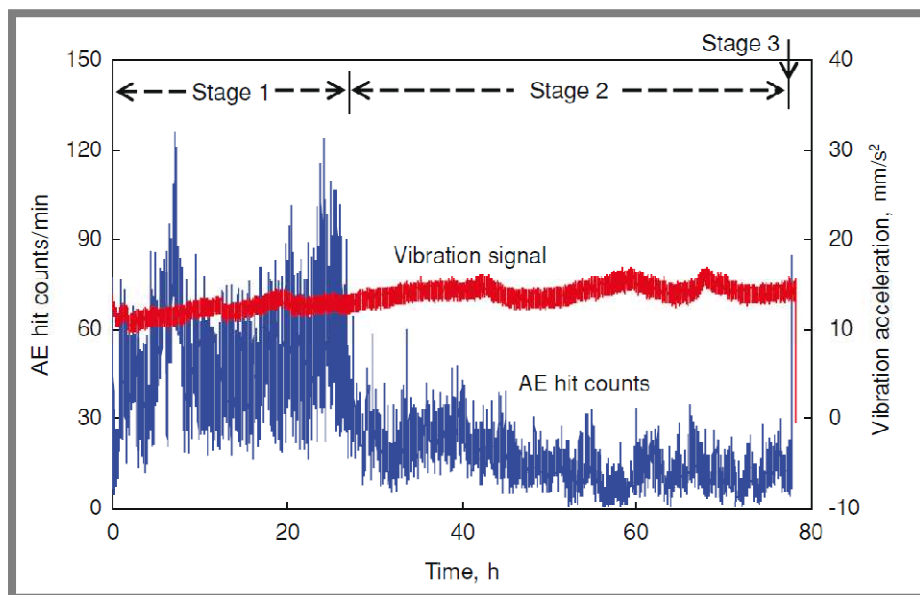
Stádium 2:

jedná se o oblast stabilního stavu, který trvá až do konce zkoušky.

Stádium 3:

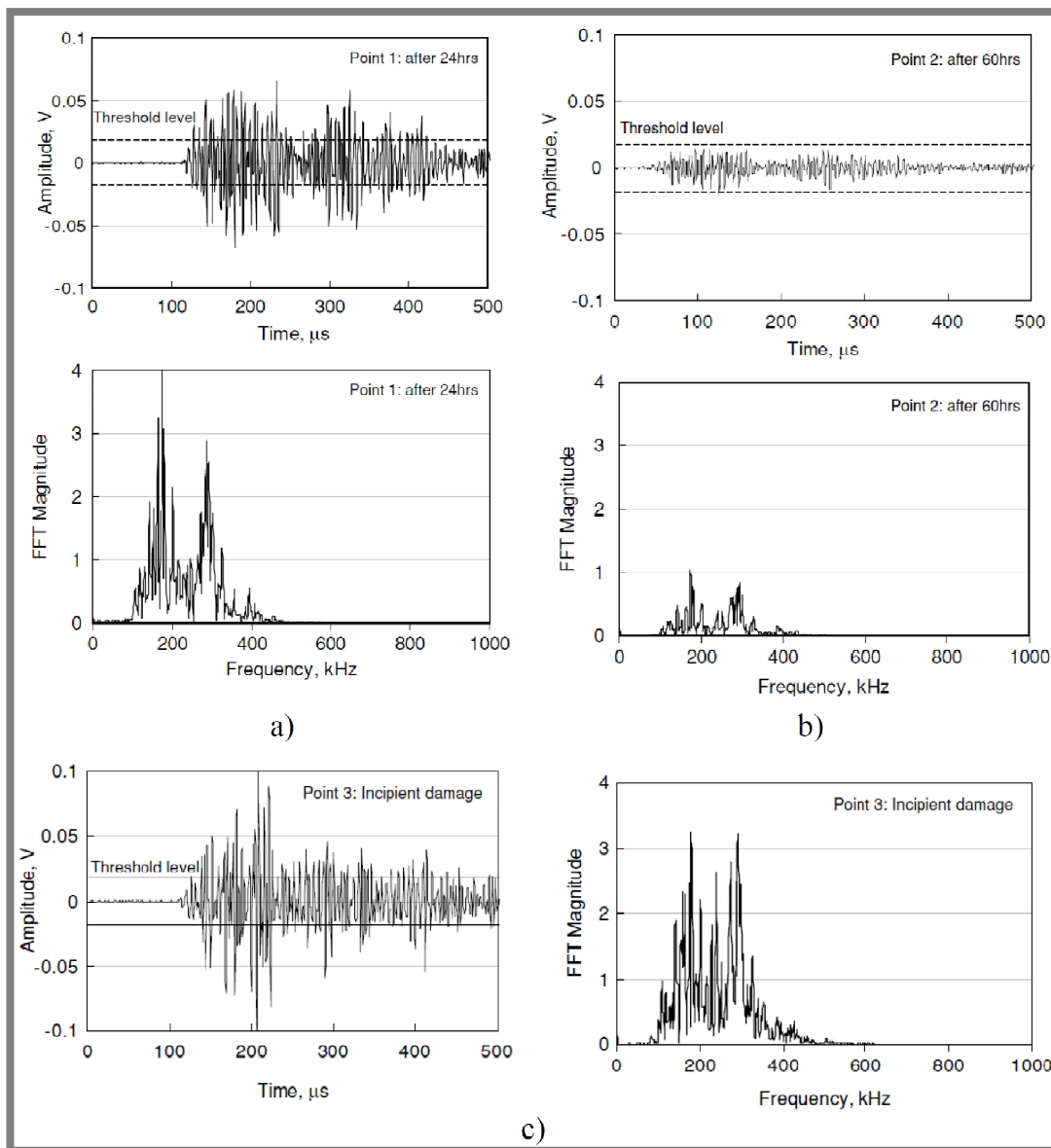
jedná se o stav počátečního poškození. Dochází k překročení nastavené prahové hodnoty a zkouška je zastavena.

Z obrázku 2.10 je také patrné, že vibrační signál během celé zkoušky nezaznamenal změny v době záběhu i na konci zkoušky. Během celé zkoušky vykazoval vibrační signál pozvolný stabilní růst.



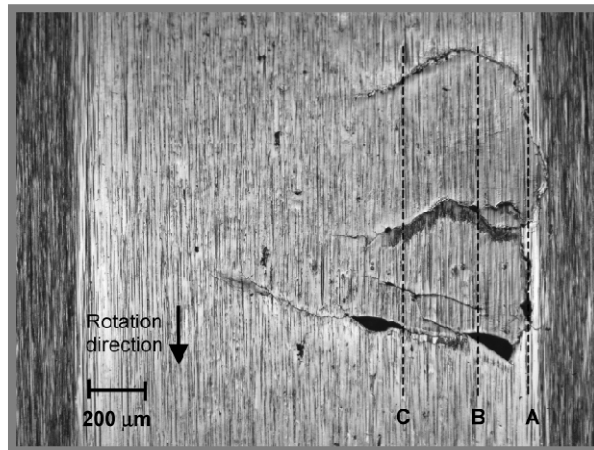
Obr. 2.10 Záznam časové četnosti překmitů a odpovídajícího vibračního signálu [25]

Na obrázku 2.11 je porovnání hitů a jejich frekvenčních spekter z jednotlivých stádií. V oblasti ustáleného stavu nebyla prakticky tato prahová hodnota překročena (obr. 2.11 b). Třetí stádium je charakteristické zvýšenou hodnotou amplitudy a četným opakováním praskavého signálu jako důsledku rozvinutého poškození v jednom místě hnaného kotouče.

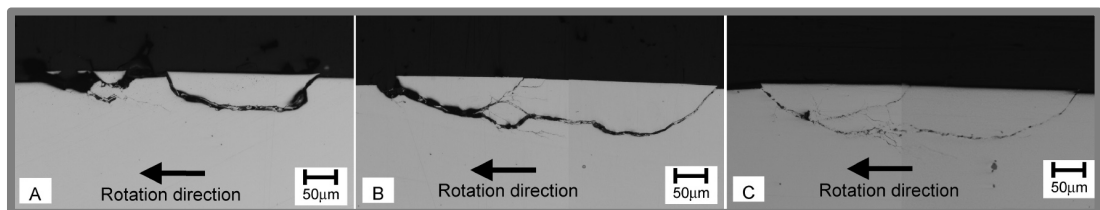


Obr. 2.11 Porovnání hitů z jednotlivých stádií s jejich frekvenčním spektrem [25]

Poškození bylo detekováno na hnaném kotouči, viz obr. 2.12. Úbytek materiálu hnacího kotouče byl  $0,25 \pm 0,05$  mg a úbytek materiálu hnaného kotouče  $0,3 \pm 0,05$  mg. Průměrné zrychlení bylo  $13 \text{ m/s}^2$ , kroticí moment  $0,04 \text{ Nm}$  a maximální teplota oleje byla  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Obr. 2.12 Morfologie poškození hnaného kotouče (S40C) [25]



Obr. 2.13 Průřezy poškozením [25]

## Závěr

Z výsledků plyne, že zkušební sestava představená v této studii je schopna s využitím metody akustické emise detekovat a lokalizovat kontaktní poškození a jeho počáteční stádium. Na rozdíl od předcházejících studií, které se zabývaly uměle iniciovaným poškozením, jde o unikátní metodu detekce a lokalizace počátečního poškození valivých elementů iniciovaného přirozeným způsobem. Z výsledků je usuzováno, že podstatným parametrem pro vyhodnocení kontaktního poškození je časová četnost překmitů.

## Zhodnocení

Tato práce potvrzuje schopnost metody akustické emise detekovat kontaktní poškození v počátečním stádiu a dále lokalizovat jeho polohu na zkoušeném kotouči. Z hlediska vyhodnocování signálu AE jsou podstatné tyto skutečnosti:

- ❖ je využita časová četnost překmitů k popisu stavu poškození;
- ❖ byly identifikovány charakteristické projevy AE (časové a frekvenční) v jednotlivých stádiích, viz obr. 2.11.

Není zde provedena detailnější parametrická analýza signálu AE, takže není jasné, zda je některý parametr závislý na vzniku a rozvoji poškození. Autor v následující práci [26] doplnil stávající studii o analýzu rozvíjejícího se poškození. Konstatoval, že časová četnost překmitů je vhodný parametr pro hodnocení kontaktní únavy.

**GUO, Y. B.; SCHVACH, D. W.**

An experimental investigation of white layer on rolling contact fatigue using acoustic emission technique, In: *International Journal of Fatigue*, 27, 2005, p. 1051 – 1061. [27]

V tomto článku se autoři zabývají vlivem bílé vrstvy, která se může vytvořit během těžkého obrábění, na životnost kontaktně zatěžované součásti. Je prezentován nový on-line systém zkoušení kontaktní únavy využívající akustickou emisi.

Hlavní cíle studie jsou:

- ❖ prezentovat nový systém zkoušení kontaktní únavy;
- ❖ vyšetřit vliv citlivosti AE na iniciaci a šíření únavových projevů;
- ❖ porovnat únavovou životnost dvou obráběných povrchů různé povrchové integrity.

**Experiment**

Pro zkoušky byla použita upravená frézka Bridgeport, schéma zatěžování viz obr. 2.18. Zatížení vzorku bylo realizováno pomocí podložky přes osm kuliček z chromové oceli o průměru 5,56 mm, tvrdosti 63 HRC, uložených nylonové kleci (eliminace sekundárních zdrojů AE). Rozsah možných otáček byl do 4000 min<sup>-1</sup>, což umožňuje realizovat zkoušky s nastavením různých otáček. Snímač akustické emise připevněn přímo na vzorek, otáčky snímány bezkontaktním tachometrem.

**Charakteristika aparatury pro měření AE**

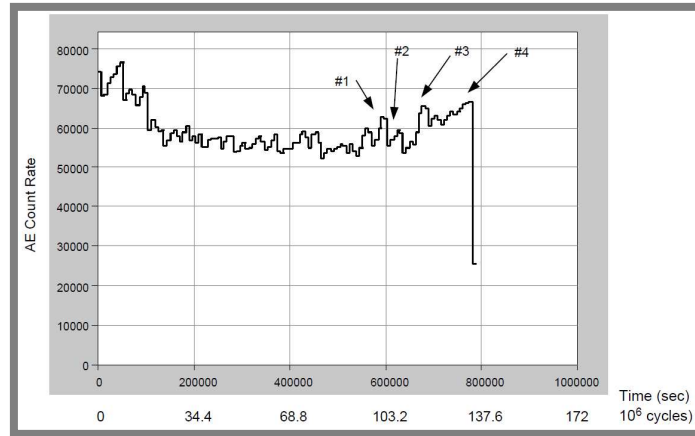
Rezonanční frekvence snímače 125 kHz; předzesilovač se zesílením 40 dB; detekční práh 45 dB. Vyhodnocované parametry AE: hity, četnost počtu překmitů, amplituda; RMS a energie.

**Podmínky zkoušky (vzorek)**

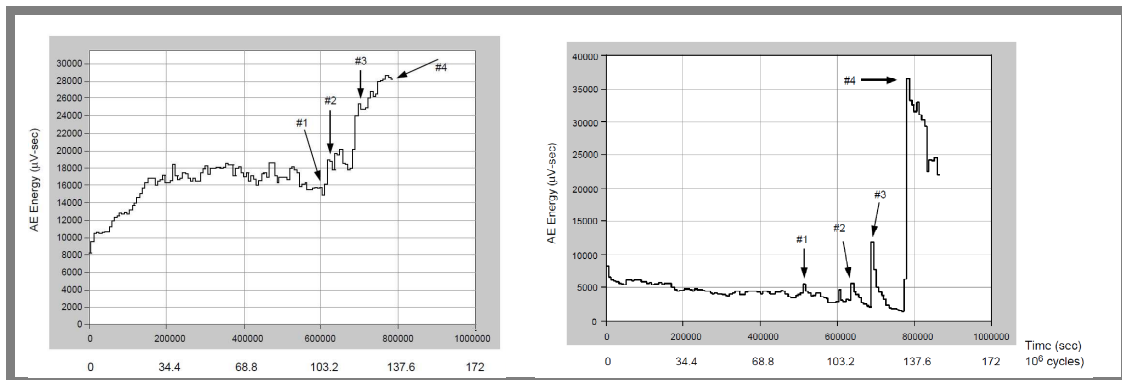
Zatížení 1334,4 N; maximální Hertzův tlak 3,68 GPa; Otáčky 2580 min<sup>-1</sup>; mazáno tukem na bázi lithného mýdla.

**Vzorek:**

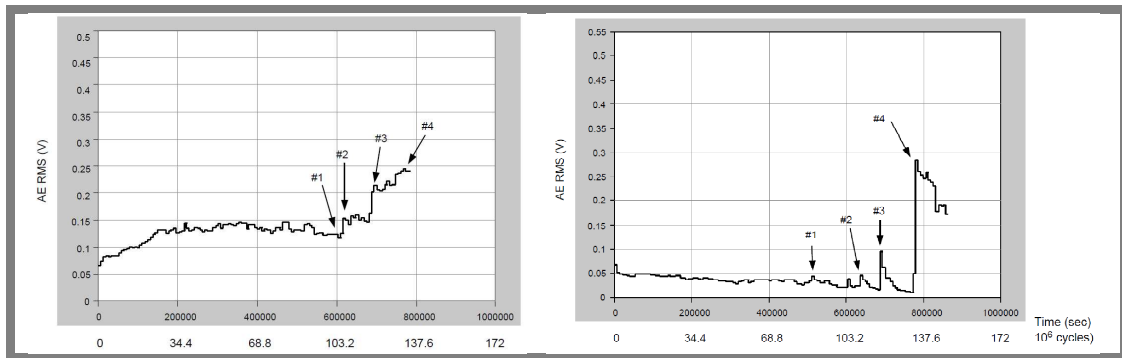
Vzorek diskového tvaru vyroben z oceli AISI 52100 (ČSN 41 4109), 61÷62 HRC. První vzorek (bez bílé vrstvy) obrobena menší řeznou rychlostí s novým ostřím, druhý vzorek (s bílou vrstvou) obrobena vyšší rychlostí s opotřebovaným břitem nástroje. Kvůli izolaci efektu bílé vrstvy na kontaktní únavu byly oba vzorky vyleštěny na drsnost povrchu Ra = 0,1 μm.



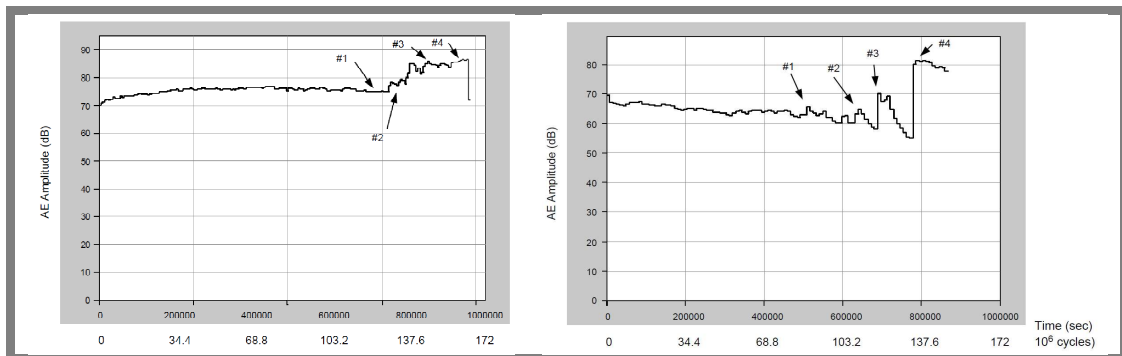
Obr. 2.14 Časová četnost překmitů během zkoušky vzorku bez bílé vrstvy [27]



Obr. 2.15 Absolutní energie AE ze vzorku bez bílé vrstvy (vlevo) a s bílou vrstvou (vpravo) [27]



Obr. 2.16 RMS signálu AE ze vzorku bez bílé vrstvy (vlevo) a s bílou vrstvou (vpravo) [27]



Obr. 2.17 Amplituda signálu AE ze vzorku bez bílé vrstvy (vlevo) a s bílou vrstvou (vpravo) [27]

## Výsledky

Jednotlivé změny během kontaktní únavy jsou v obrázcích 2.14 až 2.17 značeny následovně:

- #1 – začátek šíření trhliny;
- #2 – indikace prvotního pittingu;
- #3 – indikace výrazného pittingu;
- #4 – spalling v důsledku akumulace pittingu.

## Vzorek bez bílé vrstvy

Po zkoušce bylo zjištěno odloupení materiálu (spalling) o šířce 0,65 mm odpovídající signálu AE v místě označeném v obrázcích #4. Během prvních 20 mil cyklů dochází k snižování intenzity časové četnosti překmitů. Tento jev je způsoben elastickými a plastickými deformacemi v počáteční fázi. Byl prokázán vliv přidání maziva na snížení intenzity časové četnosti překmitů, z tohoto důvodu nebyl v případě vzorku s bílou vrstvou tento parametr posuzován. Energetické parametry (RMS, energie) indikují náhlé uvolnění elastické energie, pravděpodobně způsobené šířením trhliny.

## Vzorek s bílou vrstvou vs. vzorek bez bílé vrstvy

Porovnáním charakteristik v obr. 2.15 až 2.17 můžeme konstatovat, že vzorek s bílou vrstvou měl nižší hodnoty amplitudy signálu AE, RMS a energie a v závěrečném stádiu poškození rostly parametry RMS a energie intenzivněji než u vzorku bez bílé vrstvy, viz obr. 2.15 a 2.17. Ke vzniku a šíření trhliny dochází u vzorku s bílou vrstvou dříve a intenzivněji.

## Závěr

- ❖ Byla prokázána schopnost tohoto zkušební soustavy detekovat vznik a šíření únavy materiálu;
- ❖ parametry: energie, RMS a maximální amplituda prokázaly lepší citlivost na vznik a šíření kontaktní únavy. Zatímco časová četnost překmitů nebyla tak citlivá jako ostatní zmiňované parametry, i když lze obecně konstatovat, že její hodnota rostla s rozvojem poškození;
- ❖ je konstatováno, že vzorky bez bílé vrstvy prokázaly vyšší odolnost proti vzniku a šíření únavové trhliny v porovnání se vzorky s bílou vrstvou v totožné povrchové úpravě.

## Zhodnocení

Je zde prezentován jednoduchý systém zkoušení morfologicky podobný zkušební stanici AXMAT. Z výsledků experimentu vyplývá, že energetické parametry (absolutní energie, RMS) a max. amplituda prokázaly větší citlivost na detekci poškození. Parametr časové četnosti překmitů byl silně ovlivněn přidáním maziva a nebyl tak citlivý na progresy poškození jako dříve zmíněné parametry. Byla zjištěna vyšší odolnost vzorků bez bílé vrstvy.

**WARREN, A. W. AND GUO, Y. B.**

Acoustic emission monitoring for rolling contact fatigue of superfinished ground surfaces. *International Journal of Fatigue*, Apr 2007, vol. 29, no. 4, p. 603-614. [28]

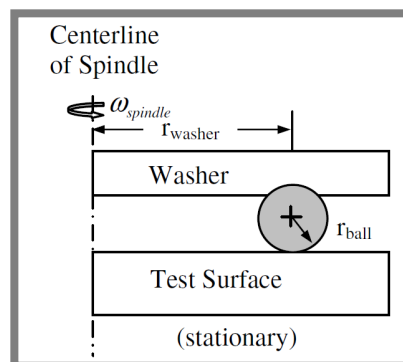
Tato práce volně navazuje na předchozí článek a zabývá studiem vlivu broušeného povrchu na kontaktní únavu vzorků z oceli AISI 52100 (ekvivalent oceli 14 109). Pro zkoušku byl vzorek vyleštěn a ke zkoušce byla použita stejná testovací a měřicí aparatura jako v [27]. Během zkoušek byly analyzovány tři vzorky. Pro názornost jsou zde zobrazeny pouze výsledky ze zkoušek jednoho vzorku.

**Experiment**

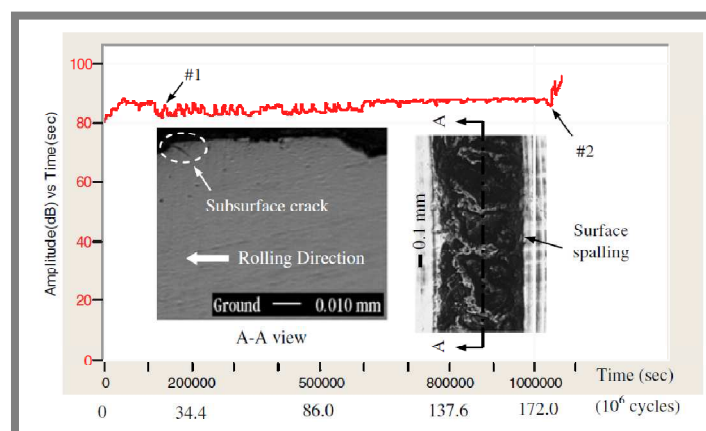
Během zkoušky byly analyzovány parametry AE: maximální amplituda, RMS, absolutní energie, četnost počtu překmitů a průměrná frekvence. Zde je obr. charakterizující průběh RMS vynechán – charakteristika přibližně odpovídá absolutní energii, obr. 2.12.

**Podmínky zkoušky (vzorek)**

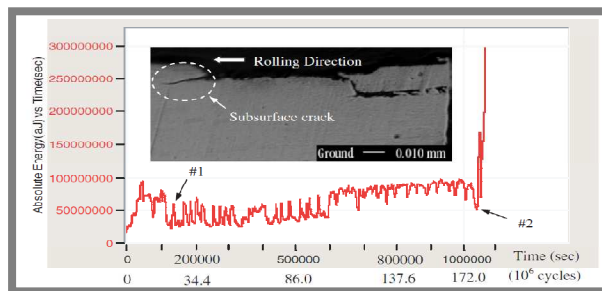
Zatížení 2224,1 N; maximální Hertzův tlak 4,60 GPa; Otáčky 2590 min<sup>-1</sup>; mazáno tukem na bázi lithného mýdla.



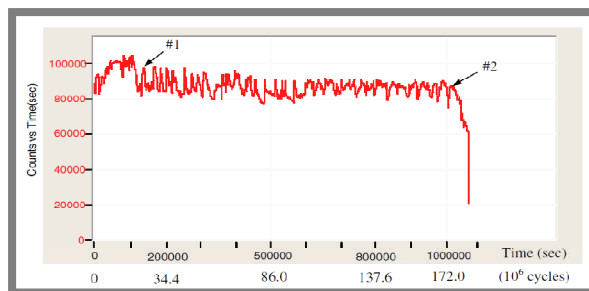
Obr. 2.18 Systém zatěžování – uspořádání zkoušky [28]



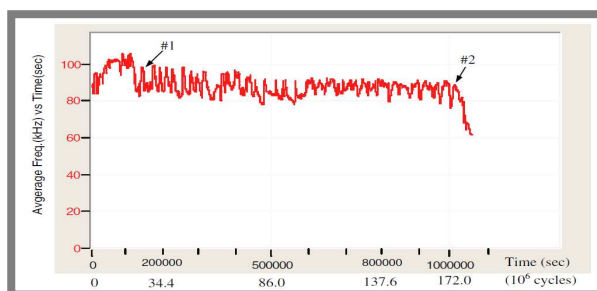
Obr. 2.19 Průběh max. amplitudy signálu AE [28]



Obr. 2.20 Absolutní energie signálu AE [28]



Obr. 2.21 Průběh počtu překmitů [28]



Obr. 2.22 Průběh průměrné frekvence [28]

## Závěr

Byla posuzována citlivost parametrů akustické emise – četnost počtu překmitů, RMS, absolutní energie, max. amplituda a střední frekvence na projevy kontaktní únavy:

- ❖ max. amplituda, RMS, absolutní energie jsou citlivé na únavové poškození. Zpočátku dochází k zvýšení hodnot těchto parametrů v důsledku plastické deformace (záběhu), následuje stabilní oblast a v závěru rozvoj poškození. Kolísání hodnot je připisováno vlivu maziva;
- ❖ četnost počtu překmitů a průměrná frekvence klesají s počátkem únavového procesu, doplnění maziva způsobuje značné výkyvy signálu.

## Zhodnocení

V této studii se jako vhodné parametry pro detekci vzniku a rozvoje kontaktního poškození projeví max. amplituda, RMS a absolutní energie. Četnost počtu překmitů a průměrná frekvence jsou citlivé na změny mazání a reagují na počátek únavového procesu poklesem.

### 3 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Výše zmíněné studie popsaly způsoby zpracování signálů akustické emise zacílené na vyhodnocování kontaktní únavy. Pro jednotlivé zkoušky byly použity různé typy zkušebních zařízení, buď na principu zabírajících kotoučů [25] (podobné stanicím R-MAT – UK FSI) nebo zařízením axiálně zatěžující vzorek diskového tvaru přes sadu kuliček [19, 20, 27–29], jehož výhodou je možnost zkoušek standardních ložisek a tedy i možnost přenesení zjištěných závislostí ze zkoušek materiálů na zkoušky ložisek. Ve všech studiích se prokázalo, že akustická emise detekuje dřívější stádium kontaktního poškození oproti vibracím.

Pro identifikaci iniciace a šíření poškození se zdá jako optimální volit energetické parametry AE typu RMS, absolutní energie nebo maximální amplitudy [27, 28]. Naopak v práci [10] byla stanovena jako vhodný parametr časová četnost překmitů, což potvrzuje původní práci Yoshioky a Fujiwary [14]. Tato rozdílnost může být způsobena buď jiným typem zkušebního zařízení, či provázaností autorů obou studií, jelikož hodnocení časové četnosti překmitů je díky nastavování detekčního prahu závislé na zkušenosti experimentátora. V práci [23] je prezentována metoda energetického indexu, která je vhodná pro identifikaci praskavého signálu, zejména v počátečním stádiu. Statistické parametry špičatost a činitel výkyvu [19, 31] se zdají být dobrými detektory počátečního stádia poškození, v pokročilejším stádiu však ztrácejí informační hodnotu. Důležitou oblastí pro užití pokročilých analýz signálu je předzpracování dat s cílem zamezení vlivu sekundárních zdrojů v signálu akustické emise. Jako důležitý nástroj v odhadu parametrů pásmové propusti při filtraci surového signálu se začíná jevit spektrální koeficient špičatosti [21]. Další možností filtrace je užití dekompozice signálu pomocí vlnkové transformace. Podobnou oblastí v Ústavu konstruování se zabýval Hort [30], jehož práce je zaměřena na diagnostiku poškození radiálních ložisek způsobené různými faktory. Práce nicméně neobsahuje studium detekce kontaktního poškození různých materiálů. Tato dizertační práce bude na jeho práci navazovat především v oblasti metodiky měření.

Pro další studium by mohlo být přínosné identifikovat vhodné parametry AE citlivé na detekci projevů kontaktní únavy a vytvořit algoritmus vyhodnocování pro přesnější identifikaci poškození. K tomuto účelu bude vhodné provést časově-frekvenční analýzu signálů z provedených zkoušek a využít energetické parametry, které prokázaly schopnost dobře reagovat na rozvoj kontaktního poškození. Práce Elforjaniho [31] prezentuje metodiku hodnocení kontaktního poškození na vzorcích při nízkých otáčkách. Nicméně tato metodika nebyla zatím ověřena při vyšších otáčkách (typických pro zkušební stroje kontaktní únavy) a na různých typech materiálů.

## 4 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

---

**4**

Cílem této dizertační práce je ověření metodiky extrakce parametrů pro hodnocení kontaktní únavy a rozšíření její aplikace na více materiálů (zobecnění). S následným cílem přenést tyto poznatky na zkoušky axiálních valivých ložisek. To vyžaduje vytvoření optimalizovaného nástroje pro hodnocení kontaktní únavy materiálů metodou akustické emise. Předpokladem je vývoj algoritmu vyhodnocování a nalezení parametrů pro zpřesněnou identifikaci kontaktní únavy vybraných kovových materiálů. Tato problematika nebyla zatím komplexně popsána, existují pouze částečné studie.

Realizace cíle dizertační práce předpokládá splnění následujících dílčích cílů:

- ❖ rozpracování stávající metodiky měření;
- ❖ předběžný výběr parametrů;
- ❖ zkoušky vzorků vybraných materiálů na stanici AXMAT;
- ❖ zkoušky na axiálních ložiscích;
- ❖ analýza dat a nalezení vhodných parametrů pro detekci kontaktního poškození;
- ❖ tvorba algoritmu vyhodnocení;
- ❖ experimentální verifikace vzniklého algoritmu;
- ❖ spolupráce se specializovanou firmou na tvorbě softwaru pro přesnější detekci kontaktní únavy;
- ❖ implementace výstupů na nově vyvíjené zařízení pro diagnostiku kontaktní degradace (modernizace stanice AXMAT).

### Přínos práce

Hlavním přínosem práce je zpřesněná identifikace kontaktní degradace a ověření metodiky pro zkoušky různých materiálů.

## 5 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Na základě rešerše byla pro realizaci zkoušek zvolena stanice AXMAT, obr. 5.1. Její konstrukce umožňuje provádění zkoušek buď na vzorcích diskového tvaru, nebo lze využít i pro axiální ložiska.

Byla rozšířena základní metodika měření a naměřeny vstupní soubory dat na vzorcích z ložiskové oceli 14 109, které se nyní analyzují, viz 5.2. Pro zkoušky bude použito nového zařízení XEDO-IPL umožňující standardní sledování uzlu analyzátozem XEDO a zároveň detailní vzorkování systémem IPL. Analyzátor XEDO bude sloužit pro průběžné monitorování signálu AE a záznamu parametrů: RMS, četnost překmitů, hitů. V případě, že zvolený parametr překročí prahovou hodnotu, bude aktivováno IPL pro úplný záznam signálu.

Jako referenční parametr byla zvolena RMS, její nárůst nad prahovou hodnotu bude sloužit jako spínací podmínka pro IPL.



Obr. 5.1 Stanice AXMAT a detail měřicího uzlu

### Volba materiálu pro zkoušky:

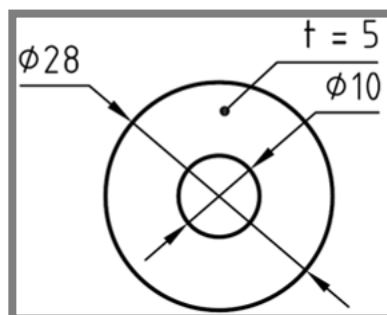
Zkoušky budou probíhat na několika zvolených materiálech, viz Tab. 1.

Tab. 1 Zvolené materiály (značeno dle ČSN)

<b>LOŽISKOVÁ OCEL</b>	<b>14 109</b>
<b>CEMENTAČNÍ OCEL</b>	<b>14 220</b>
<b>NÁSTROJOVÁ OCEL</b>	<b>19 802</b>
<b>LITINA</b>	<b>42 2456</b>

Materiály byly zvoleny s ohledem na jejich využitelnost v praxi u kontaktně namáhaných součástí. Z těchto materiálů již jsou vyrobeny vzorky diskového tvaru pro stanici AXMAT a následně provedeny zkoušky. Z rešerše předpokládáme, že

parametry akustické emise mohou reagovat odlišně na zkoušky různých typů materiálů.



Obr. 5.2 Nákres vzorku

## 5.1 Předběžný výběr parametrů AE

5.1

Pro sledování změn bylo potřeba předběžně zvolit parametry akustické emise. Z rešerše vyplývá, že nejvhodnějšími parametry pro hodnocení kontaktní únavy jsou energetické parametry typu RMS, absolutní energie a informační entropie. Ovšem z rešerše nevyplývá jednotný názor na volbu parametrů, i když volba energetických parametrů převažuje.

Z tohoto důvodu budou jako primární deskriptory uvažovány energetické parametry. Nicméně jako vedlejší parametry budou sledovány i parametrické ukazatele jako je četnost překmitů apod.

V oblastech vytipovaných pomocí RMS, bude provedena detailnější analýza pomocí vlnkové analýzy a FFT.

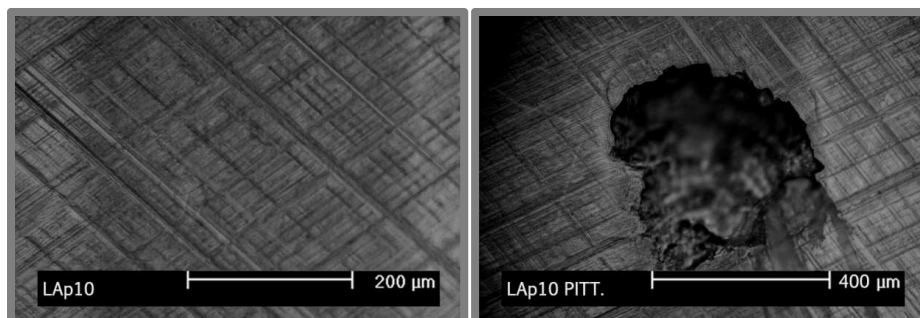
## 5.2 Výsledky předběžných experimentů

5.2

Byly zahájeny předběžné zkoušky ložiskového materiálu ČSN 41 4109.

### Parametry zkoušky:

Zatížení 3000 N;  
otáčky  $1380 \text{ min}^{-1}$ ;  
mazáno plastickým mazivem RENOLIT EP2;  
průměr kuliček 4,67 mm (12 ks);  
drsnost povrchu:  $R_a 0,2 \pm 0,23$ .

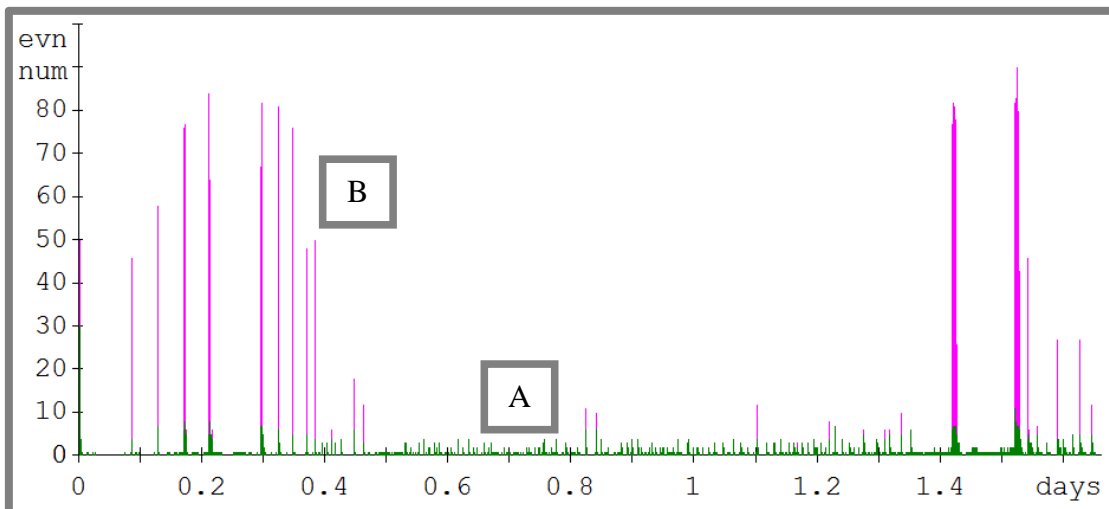


**Obr. 5.3** Detail povrchu vzorku po zkoušce

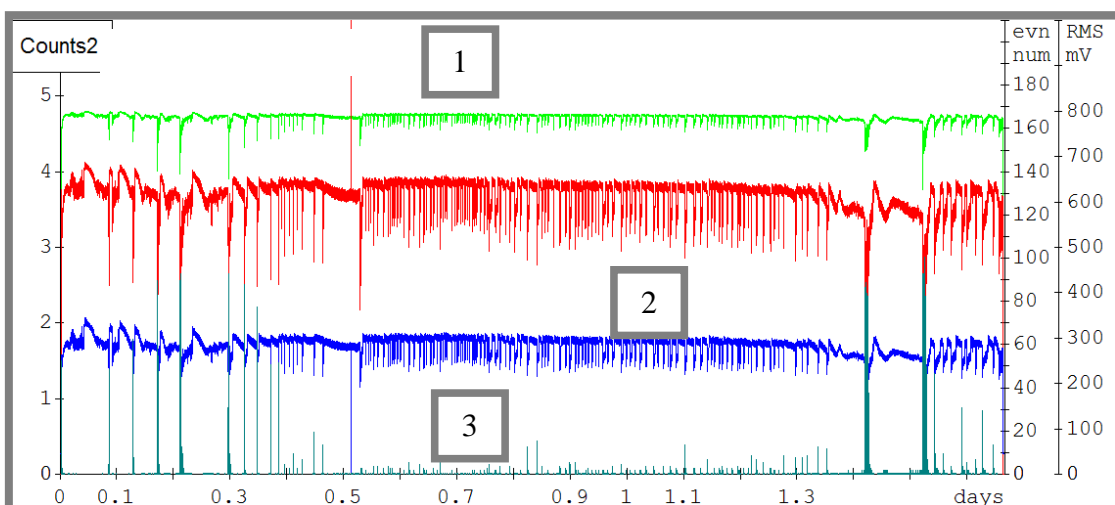
Na obrázku 5.3 je patrná valivá dráha (vlevo) a vzniklý pitting odpovídající konci zkoušky.

Na obrázcích 5.4 a 5.5 jsou potom základní parametry AE ze zkoušky. Na obr. 5.4 je porovnání amplitud jednotlivých hitů. Na obr. 5.5 můžeme vidět průběh RMS, četnosti překmitů přes detekční práh a hity. Pokud porovnáme oba obrázky, můžeme konstatovat, že v místě poklesu energie (RMS) dochází k nárůstu četnosti a velikosti amplitudy jednotlivých hitů.

Tato oblast odpovídá jednak místu elastických a plastických deformací na začátku zkoušky, kdy dochází k vytváření valivé dráhy v materiálu, tzv. stadium záběhu, tak oblasti progresu pittingu. Pro detailnější analýzu tohoto procesu budou provedeny časově-frekvenční analýzy signálu (vlnková transformace).



**Obr. 5.4** Hitů – amplituda (%) A (25÷40); B (41÷ max.)



**Obr. 5.5** RMS (2), četnost počtu překmitů (1) a hity (3)

## 6 ZÁVĚR

Toto pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje současné poznatky z oblasti identifikace parametrů akustické emise charakterizující mechanické poškození. Z důvodů závislosti způsobu zpracování a volby vhodných parametrů pro analýzu na zdroji akustické emise, tj. fyzikálního procesu generujícího akustickou emisi (plastická deformace, tření apod.), byla v úvodu této práce zúžena oblast na identifikaci parametrů AE popisující vznik a rozvoj kontaktního poškození v kovových materiálech. Kromě prací popisující různé metody zpracování signálu v této oblasti jsou zde uvedeny i experimenty zaměřené na zkoušky materiálů zabývající se odolností proti kontaktní únavě. Z rozboru plyne, že dosud chybí porovnání a verifikace současných přístupů v identifikaci únavového poškození. Zároveň nebyla jednoznačně určena metodika vyhodnocování mechanismu iniciace a rozvoje kontaktního poškození zahrnující různé materiály. Na základě tohoto zjištění jsou formulovány cíle dizertační práce a navržen metodický postup jejího řešení.

---

**7 LITERATURA**

- [1] PŘIBÁŇ, M. *Akustická emise (AE) - teorie a praxe provozních kontrol konstrukcí*. [online]. [cit. 2012-06-20]. Dostupný z WWW: < [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_06\\_1205.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1205.pdf)>.
- [2] MILLER, R., HILL, E., MOORE, P. AND TESTING, A.S.F.N. *Acoustic emission testing*. Edition ed.: American Society for Nondestructive Testing, 2005. ISBN 9781571171061.
- [3] SHULL, P. *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*. Edition ed.: M. Dekker, 2002. ISBN 9780824788728.
- [4] KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1. vydání, 2008. 571 s. ISBN: 978-80-7204-591-4
- [5] VLK, M.; FLORIAN, Z. *Mezní stavy a spolehlivost (2007)* [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupný z WWW: < <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf> >.
- [6] LOUTAS, T.H. AND KOSTOPOULOS, V. Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites. Damage assessment by using advanced signal processing techniques. Part I: Acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution. *Composites Science and Technology*, Feb 2009, vol. 69, no. 2, pp. 265-272.
- [7] D.G. Aggelis, E.Z. Kordatos, T.E. Matikas, Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates, *Mechanics Research Communications*, Volume 38, Issue 2, March 2011, pp 106-110, ISSN 0093-641.
- [8] HAN, Z., LUO, H., CAO, J. AND WANG, H. Acoustic emission during fatigue crack propagation in a micro-alloyed steel and welds. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, no. 25-26, pp. 7751-7756.
- [9] HOLROYD, T. J. The application of AE in condition monitoring. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Aug 2005, 47(8), pp. 481-484, ISSN 1354-2575.
- [10] MORHAIN, A. AND MBA, D. Bearing defect diagnosis and acoustic emission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J- Journal of Engineering Tribology*, 2003, vol. 217, no. J4, pp. 257-272.
- [11] TAN, C. K. AND D. MBA Correlation between acoustic emission activity and asperity contact during meshing of spur gears under partial elastohydrodynamic lubrication. *Tribology Letters*, Sep 2005, 20(1), pp. 63-67, ISSN: 1573-2711.
- [12] SINGH, A., HOUSER, D. R. & VIJAYAKAR, S. Early detection of gear pitting, *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 88, (1996) pp.673-678, ISSN 15214613.

- [13] EFTEKHARNEJAD, B. AND D. MBA Monitoring Natural Pitting Progress on Helical Gear Mesh Using Acoustic Emission and Vibration. *Strain*, Dec 2011, 47, 299-310.
- [14] YOSHIOKA, I. AND FUJIWARA, T. Acoustic Emission and Vibration in the Process of Rolling Contact Fatigue. *Toraibojisto (J. Jpn. Soc. Tribol.)*. 1989, Vol. 34, no. 1, pp. 36-42.
- [15] CHOUDHURY, A. AND TANDON, N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, Jan 2000, vol. 33, no. 1, p. 39-45.
- [16] AL-DOSSARY, S., HAMZAH, R.I.R. AND MBA, D. Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing. *Applied Acoustics*, Jan 2009, vol. 70, no. 1, p. 58-81.
- [17] AL-GHAMD, A.M. AND MBA, D. A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Oct 2006, vol. 20, no. 7, p. 1537-1571.
- [18] YOSHIOKA, T. Detection of Rolling-Contact Subsurface Fatigue Cracks Using Acoustic-Emission Technique. *Lubrication Engineering*, Apr 1993, 49(4), 303-308.
- [19] ELFORJANI, M. AND MBA, D. Detecting the onset, propagation and location of non-artificial defects in a scow rotating thrust bearing with acoustic emission. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, May 2008, vol. 50, no. 5, p. 264-268, ISSN 1354-2575.
- [20] ELFORJANI, M. AND MBA, D. Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with Acoustic Emission. *Engineering Fracture Mechanics*, Jan 2010, vol. 77, no. 1, p. 112-127
- [21] EFTEKHARNEJAD, B., CARRASCO, M. R., CHARNLEY, B. AND MBA, D. The application of spectral kurtosis on Acoustic Emission and vibrations from a defective bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Jan 2011, vol. 25, no. 1, p. 266-284.
- [22] HE, Y. Y., ZHANG, X. M. AND FRISWELL, M. I. Observation of time-frequency characteristics of the acoustic emission from defects in rolling element bearings. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Aug 2010, vol. 52, no. 8, p. 412-418, ISSN 1354-2575.
- [23] AL-BALUSHI, K. R., ADDALI, A., CHARNLEY, B. AND MBA, D. Energy Index technique for detection of Acoustic Emissions associated with incipient bearing failures. *Applied Acoustics*, Sep 2010, vol. 71, no. 9, p. 812-821.
- [24] AL-BALUSHI KR, SAMANTA B. Gear fault diagnosis using energy-based features of acoustic emission signals. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2002;216(3):249-63.

- [25] RAHMAN Z., OHBA H., YAMAMOTO T. AND YOSHIOKA T. A Study on Incipient Damage Monitoring in Rolling Contact Fatigue Process Using Acoustic Emission, *Tribology Transactions*, 2008, 51:5, 543-551.
- [26] RAHMAN Z., OHBA H., YOSHIOKA T., YAMAMOTO T., Incipient damage detection and its propagation monitoring of rolling contact fatigue by acoustic emission, *Tribology International*, Volume 42, Issue 6, June 2009, Pages 807-815, ISSN 0301-679.
- [27] GUO, Y. B.; DALE; SCHVACH, W. An experimental investigation of white layer on rolling contact fatigue using acoustic emission technique, In: *International Journal of Fatigue*, 27, 2005, p. 1051 – 1061.
- [28] WARREN, A.W. AND GUO, Y.B. Acoustic emission monitoring for rolling contact fatigue of superfinished ground surfaces. *International Journal of Fatigue*, Apr 2007, vol. 29, no. 4, p. 603-614.
- [29] ELFORJANI, M.; MBA, D. Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in slow speed rolling element bearing with acoustic emission. In: *Journal of vibration and acoustics-transactions of the ASME*. Volume: 130, Issue: 4, p. 14, ASME, USA, 2008, ISSN 1048-9002
- [30] 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.
- [31] ELFORJANI, M. A. *Condition Monitoring of Slow Speed Rotating Machinery Using Acoustic Emission Technology*. Cranfield:Cranfield University,School of Engineering, 2010. 148 s. Vedoucí dizertační práce Dr. David Mba.

**8 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK**

<b>Obr. 1</b>	Frekvenční pásmo akustické emise .....	<b>5</b>
<b>Obr. 2</b>	Praskavý signál (vpravo) a spojitý signál (vlevo).....	<b>6</b>
<b>Obr. 3</b>	Základní parametry hitu.....	<b>6</b>
<b>Obr. 2.1</b>	Zkoušený vzorek .....	<b>10</b>
<b>Obr. 2.2</b>	Porovnání parametrů AE, teploty a vibrací .....	<b>11</b>
<b>Obr. 2.3</b>	Záznam zkoušky do výskytu poškození detekovatelného vizuálně .....	<b>11</b>
<b>Obr. 2.4</b>	Výsledky informační entropie, špičatosti a činitele výkyvu .....	<b>12</b>
<b>Obr. 2.5</b>	Porovnání výsledků filtrace signálu .....	<b>14</b>
<b>Obr. 2.6</b>	Detail d4 DWT ze signálu AE podmínky zkoušky (L1, S1, D1) .....	<b>16</b>
<b>Obr. 2.7</b>	Analýza akustické emise za podmínek (L1, S1, D1) .....	<b>16</b>
<b>Obr. 2.8</b>	EI ze signálu akustické emise s náhodným šumem; L = 8,9 kN, S = 1000 min-1 .....	<b>18</b>
<b>Obr. 2.9</b>	Schematický diagram systému zpracování dat .....	<b>19</b>
<b>Obr. 2.10</b>	Záznam časové četnosti překmitů a odpovídajícího vib. signálu .....	<b>20</b>
<b>Obr. 2.11</b>	Porovnání hitů z jednotlivých stádií s jejich frekvenčním spektrem...	<b>21</b>
<b>Obr. 2.12</b>	Morfologie poškození hnaného kotouče (S40C) .....	<b>22</b>
<b>Obr. 2.13</b>	Průřezy poškozením .....	<b>22</b>
<b>Obr. 2.14</b>	Časová četnost překmitů během zkoušky vzorku bez bílé vrstvy .....	<b>24</b>
<b>Obr. 2.15</b>	Absolutní energie AE ze vzorku bez bílé vrstvy (vlevo) a s bílou vrstvou (vpravo) .....	<b>24</b>
<b>Obr. 2.16</b>	RMS signálu AE ze vzorku bez bílé vrstvy (vlevo) a s bílou vrstvou (vpravo) .....	<b>24</b>
<b>Obr. 2.17</b>	Amplituda signálu AE ze vzorku bez bílé vrstvy (vlevo) a s bílou vrstvou (vpravo) .....	<b>24</b>
<b>Obr. 2.18</b>	Systém zatěžování – uspořádání zkoušky .....	<b>26</b>
<b>Obr. 2.19</b>	Průběh max. amplitudy signálu AE.....	<b>26</b>
<b>Obr. 2.20</b>	Absolutní energie signálu AE .....	<b>27</b>
<b>Obr. 2.21</b>	Průběh počtu překmitů.....	<b>27</b>
<b>Obr. 2.22</b>	Průběh průměrné frekvence.....	<b>27</b>
<b>Obr. 5.1</b>	Stanice AXMAT a detail měřicího uzlu .....	<b>30</b>
<b>Obr. 5.2</b>	Nákres vzorku .....	<b>31</b>
<b>Obr. 5.3</b>	Detail povrchu vzorku po zkoušce .....	<b>31</b>
<b>Obr. 5.4</b>	Hity – Amplituda (%) A (25÷40); B (41÷max).....	<b>32</b>
<b>Obr. 5.5</b>	RMS, četnost počtu překmitů a hity .....	<b>32</b>

**SEZNAM TABULEK**

<b>Tab. 1</b>	Zvolené materiály .....	<b>30</b>
---------------	-------------------------	-----------

---

**9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

<b>AE</b>	akustická emise
<b>ASL</b>	průměrná hodnota signálu
<b>AXMAT</b>	experimentální zkušební stanice pro axiálně zatížené vzorky
<b>BPF</b>	poruchová frekvence
<b>CF</b>	crest factor – činitel výkyvu
<b>CWT</b>	spojitá vlnková transformace
<b>dB</b>	decibel
<b>DWT</b>	diskrétní vlnková transformace
<b>EI</b>	energetický index
<b>FFT</b>	fast Fourier transform (rychlá Fourierova transformace)
<b>HIT</b>	označuje událost AE, která překročila detekční práh
<b>IE</b>	informační entropie
<b>IPL</b>	označení analyzátoru fy DAKEL pro kontinuální snímání signálu
<b>KU</b>	špičatost
<b>NDT</b>	nedestruktivní zkoušení
<b>Ra</b>	průměrná aritmetická úchylka povrchu
<b>RMS</b>	efektivní hodnota signálu
<b>SK</b>	spectral kurtosis – spektrální koeficient špičatosti
<b>SNR</b>	odstup signálu od šumu
<b>STFT</b>	short-time Fourier Transform – krátkodobá Fourierova transformace
<b>XEDO</b>	označení analyzátoru fy DAKEL



