



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KATEGORIZACE SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE PŘI CYKLICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ DÍLCŮ

ACOUSTIC EMISSION SIGNAL CLASSIFICATION AT CYCLIC LOADING OF PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL STEIN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL MAZAL, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Stein Pavel, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Kategorizace signálu akustické emise při cyklickém namáhání dílců

v anglickém jazyce:

Acoustic emission signal classification at cyclic loading of parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza signálu akustické emise při zatěžování dílců užitím dostupných softwarových prostředků

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
7. Konstrukční řešení
8. Závěr (Konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení)

Forma diplomové práce: průvodní zpráva a technická dokumentace

Typ práce: analytická

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK s prvky pro potřeby průmyslu

Seznam odborné literatury:

Kopec B. a kol.: nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. CERM Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4

Kreidl M., Šmíd R.: Technická diagnostika. BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6.

Moore P.O.: Nondestructive Testing Handbook - Acoustic Emission Testing. ASNT, 2005, ISBN 1-57117-106-1.

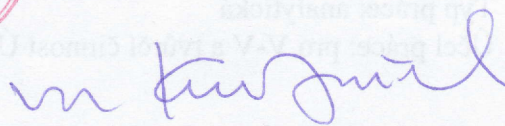
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 23.11.2009



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na hlubší analýzu signálu akustické emise. Podkladem pro analýzu jsou data ze zkoušek ložiskových materiálů a reálných ložisek, které byly testovány na stanici Axmat. Data byla zpracována pomocí programovacího jazyka Matlab a Python. Dále jsem vytvořil postup pro identifikaci fází poškození pomocí jednotlivých emisních událostí. Výsledky jsou zaneseny do časových grafů. Snahou celé práce je dále rozvíjet možnosti aplikace akustické emise v praxi na reálných strojích, kde by mohla být ložiska monitorována a predikce poruchy by byla daleko včasnější než s doposud využívanou vibrační diagnostikou.

KLÍČOVÁ SLOVA

akustická emise, ložisko, nedestruktivní zkoušení, emisní událost

ABSTRACT

This master's thesis is concerned analysis of signal of acoustic emission. The analysis is based on data of bearing material and real bearings testing, tested in the Axmat stands. The data was run by software Matlab and Python. Below I created plan for identification of damage stage depending on particular AE events. The results are put into diagram. Finally I'm trying to develop the new possibilities of using acoustic emission into practice on the real machines. There could be earlier prediction of a defect of monitored bearings compared to vibrating diagnostic used until now.

KEYWORDS

acoustic emission, bearing, nondestructiv testing, AE event

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STEIN, P. *Kategorizace signálu akustické emise při cyklickém namáhání dílců*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Kategorizace signálu akustické emise při cyklickém namáhání dílců* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Mazala, CSc. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a jiné odborné zdroje.

V Brně dne 20. května 2010

vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc. za cenné připomínky a rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu při studiu na vysoké škole.

ÚVOD	13
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
1.1 Metody nedestruktivního zkoušení	14
1.1.1 Prozařovací metody	14
1.1.2 Ultrazvuk	15
1.1.3 Kapilární metody	16
1.1.4 Metoda výřivých proudů	17
1.2 Teorie akustické emise.....	18
1.2.1 Charakteristika a princip akustické emise	18
1.2.2 Specifika akustické emise.....	19
1.2.3 Událost akustické emise	19
1.2.4 Vlny	20
1.2.5 Zdroje AE	21
1.2.6 Kaiserův jev	21
1.2.7 AE v přerušení průběhu zatěžování	22
1.2.8 Felicitioho jev	22
1.2.9 Použití akustické emise u cyklicky zatěžovaných materiálů	23
1.3 Popis a vyhodnocení signálu akustické emise	23
1.3.1 Popis signálu pomocí základních parametrů AE	23
1.3.2 Vyhodnocení signálu AE	25
1.3.3 Vícekanálová měření AE	25
1.3.4 Kompletace hitů (emisních událostí) do událostí AE	26
1.3.5 Lokalizace událostí AE	26
1.3.6 Vyhodnocení zdrojů AE	27
1.4 Měřicí zařízení	27
1.4.1 Snímače	27
1.4.2 Způsoby upevnění snímačů	28
1.4.3 Kalibrace snímačů	28
1.4.4 Uspořádání měřicí techniky	28
1.4.5 Předzesilovače	29
1.4.6 Kabelové trasy	29
1.4.7 Úprava signálu v měřicím systému před vyhodnocením.....	29
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA	30
2.1 Vybrané aplikace metody akustické emise	30
2.2 Reálné pracovní podmínky	31
2.3 Výzkumná činnost v oblasti zpracování signálu AE	32
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	34
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	35
4.1 Realizované zkoušky	35
4.1.1 Zkoušené součásti	35
4.1.2 Podmínky zkoušky a měřicí technika	36
4.2 Postprocessing	38
4.2.1 První úroveň zpracování signálu - informativní	38
4.2.2 Druhá úroveň zpracování signálu – identifikace fází únavového života ložiska	40
4.2.3 Třetí úroveň zpracování signálu - analýza vzorků signálu	42

4.2.4	Třetí úroveň zpracování signálu – zpracování zaznamenaných hlavních parametrů všech emisních událostí	47
5	ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ	49
5.1	Kategorizace událostí akustické emise.....	49
5.2	Závislosti hlavních parametrů emisních událostí na čase zkoušky	52
6	DISKUZE	55
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	57
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	59
8.1	Seznam použitých zkratk.....	59
8.2	Seznam použitých symbolů a veličin	59
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
10	SEZNAM TABULEK.....	62
11	SEZNAM PŘÍLOH.....	63

ÚVOD

Moderní typy konstrukcí vyžadují účelné využití materiálů. Tím jsou určeny nezbytné požadavky na co nejdokonalejší znalost jejich vlastností a chování za nejrůznějších provozních podmínek. Zejména z obav z havárií a katastrof vznikl v průběhu 19. století velmi rozsáhlý obor technické zkušebnictví. Díky němuž se postupně vyvíjela celá řada zkoušek, pomocí kterých se určují základní materiálové charakteristiky.

Zkoušky materiálů a konstrukcí lze dělit podle celé řady kritérií. Základní dělení zkoušek je následující: zkoušky chemické, fyzikální, zkoušky hodnocení struktury, zkoušky mechanické, technologické, defektoskopické,...

Podstatnou roli hraje rozdělení podle účelu zkoušek na zjišťování materiálových charakteristik, tyto poté slouží zejména pro konstruování a výpočty. Druhou oblastí využití je kontrola materiálu při provozu. Účelem tohoto typu zkoušek je předejít možné havárii zařízení, kvůli provozním opotřebením. Použití tedy nacházejí především ve výrobě a provozu.

Prakticky lze říci, že většina informací o chování a vlastnostech materiálů se získává pomocí zkoušek přímo na dané součásti popřípadě modelováním reálných situací na zkušebních vzorcích. Tyto informace a hodnoty jsou významně ovlivněny podmínkami, za kterých zkoušky probíhají. Tím nikdy nelze zaručit naprosto stejné chování materiálů i ve zdánlivě stejných podmínkách.

Co se týče konstrukční činnosti, významnou měrou jí pomáhají zkoušky mechanické, které získávají údaje pro pevnostní výpočty konstrukcí. Tyto zkoušky se dělí podle působení síly na statické a dynamické. Příkladem takovýchto typů zkoušek mohou být: zkoušky tahem, krutem, pevností ve stříhu, rázem v ohybu, tvrdosti, únavové zkoušky, atd. Díky těmto metodám se stanoví potřebné materiálové charakteristiky, ovšem nezískají se úplné informace o vnitřním chování zatěžovaných struktur.

Tyto často na povrch neviditelné pochody mohou vést často k porušení nebo úplnému zničení konstrukce. V praxi se detekují zejména za pomoci nedestruktivního zkoušení, dále jen NDT. To zahrnuje metody pro zkoušení určitého produktu nebo materiálu, aniž by se narušila budoucí použitelnost nebo schopnost vykonávat danou funkci.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Metody nedestruktivního zkoušení

Úkolem NDT je odhalovat možné odlišnosti a vady ve struktuře vznikající za provozu součástí, výrobní vady, změny na povrchu materiálu, přítomnost trhlin, nebo jiné fyzikální nehomogenity. Moderní NDT se vyznačuje tím, že [2]:

- zjišťuje celistvost výrobků a tím zajišťuje spolehlivost,
- vytváří prevenci proti selhání výrobků vlivem poruch, předchází úrazům a chrání životy,
- napomáhá lepšímu designu výrobku,
- řídí výrobní procesy,
- snižuje výrobní náklady,
- udržuje stejnou úroveň kvality,
- zajišťuje provozní připravenost.

Americký výbor pro NDT při Národním poradním orgánu pro materiály vytvořil (NMAB – The National Materials Advisory Board) systém klasifikace NDT do šesti hlavních kategorií [2]:

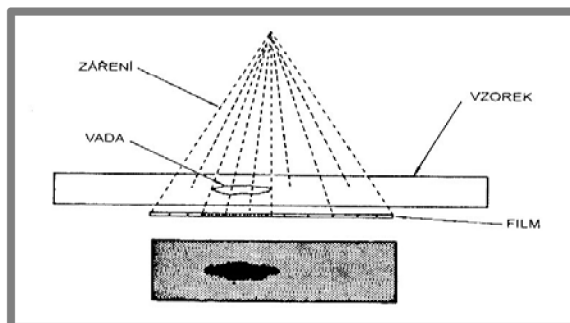
- 1) Vizuální
- 2) Pronikavé záření (radiace)
- 3) Magneticko – elektrické
- 4) Mechanické vibrace
- 5) Termální
- 6) Chemické/elektrochemické

Metody NDT se klasifikují také podle toho, zda detekují povrchové vady (vizuální metody, kapilární metody, mřížkové zkoušení, ...), nebo objemové vady, tzv. volumetrické metody (ultrazvuk, akustická emise, radiografie, ...). Rozhodně platí to, že žádná z metod NDT není schopna detekovat všechny typy vad. V praxi se nejčastěji využívají vhodné kombinace různých typů zkoušek pro dokonalou informovanost o průběhu života součásti.

1.1.1 Prozařovací metody

Základ tomuto typu zkoušek položil W. C. Röntgen, který objevil záření schopné prostupu přes hmotu v roce 1895. Objev byl natolik významný, že se stal mezníkem v medicíně, fyzice, a dalších oborech. Sám profesor mu dal název záření X. Průmyslová aplikace se začíná používat okolo roku 1915 a to na zjišťování vad u odlitků.[2]

Základní princip prozařovacích metod je na obrázku 1.1. Záření si lze představit jako energii šířící se prostorem. Pokud se šíří pomocí vlnění, hovoří se o elektromagnetickém vlnění (rentgenové záření a gama záření). Pokud se energie šíří pomocí hmotných částic, jedná se o částicové vlnění (elektrony, neutrony, částice alfa



Obr. 1.1 Princip prozařovacích metod [2]

– 4He). Výsledkem prozařovacích metod jsou radiogramy, ze kterých se určuje tvary, velikosti, polohy a druhy vad uvnitř materiálu.

1.1.2 Ultrazvuk

1.1.2

Ultrazvuk neboli zvukové vlnění, lidským uchem neslyšitelné, je znám zhruba od 18. Století. Kdy italský vědec Lazzaro Spallanzani ve své knize popisuje schopnost netopýřů létat za tmy. Dalším důležitým milníkem ve vývoji ultrazvuku bylo objevení piezoelektrického jevu, tím byl umožněn vznik přístrojů, které mohou ultrazvukové signály vytvářet a registrovat.[2]

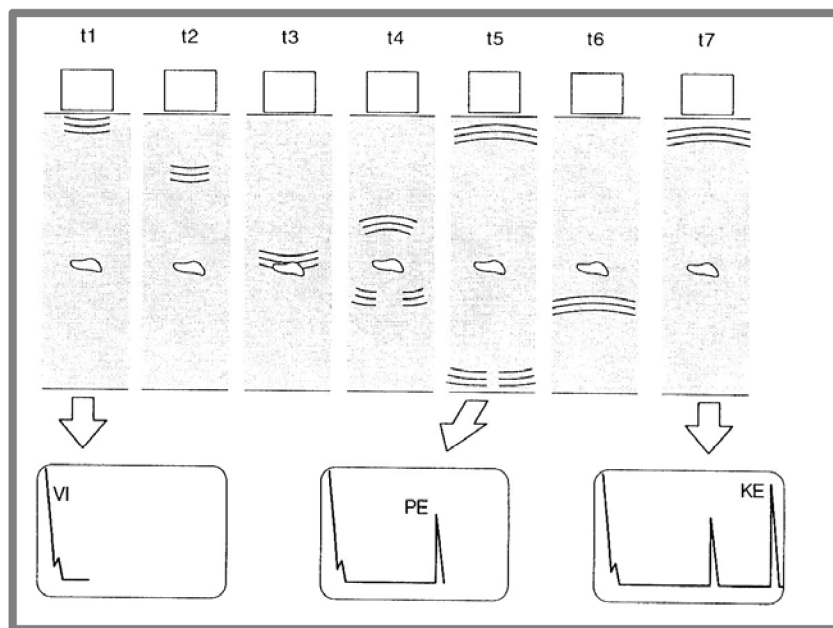
Ve zkušebnictví nachází uplatnění zejména u rozměrných odlitků, kde nepřichází v úvahu kontrola prozařovacími metodami. Ultrazvukové vlny se šíří nad hranicí slyšitelnosti prostředím alespoň částečně elastickým. Jedná se o kmitavý pohyb částic materiálu prostředí kolem rovnovážných poloh. A protože mezi částicemi existují vazbové síly, vlny se v prostředí šíří určitou rychlostí, která je pro různé materiály odlišná. V tuhých látkách závisí především na modulu pružnosti, měrné hustotě a Poissonově číslu.

Tab. 1.1 Rychlost šíření ultrazvukových vln ve vybraných materiálech [2]

Materiál	Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Poissonovo číslo μ	Rychlost podélných vln c_L [m.s ⁻¹]	Rychlost příčných vln c_T [m.s ⁻¹]
hliník	2700	0,34	6320	3130
měď	8900	0,35	4700	2260
feritická ocel	7800	0,28	5920	3250
olovo	11400	0,44	2160	700
titan	4540	-	6100	3120
zlato	19300	0,42	3240	1200

V praxi existují dvě metody zkoušení ultrazvukem. První metoda se jmenuje průchodová. Podle názvu se jedná o metodu, která využívá zeslabení ultrazvuku při průchodu místa s vadou. Tato metoda je charakterizována použitím dvojice proti sobě umístěných sond. Přičemž jedna slouží k vysílání a druhá k detekci. Z toho plynou i nevýhody: Součásti musí mít dva vhodné rovné povrchy pro umístění sond, při velké vzdálenosti mezi detekující sondou a vadou může dojít k uzavření akustického stínu za vadou, a tím sonda zaznamenává stejný signál jako bez vady. Naopak velkou výhodou průchodové metody je to, že ultrazvuk v porovnání s metodou odrazovou prochází poloviční dráhou. Časté použití lze najít ve zkoušení pryže (nejčastěji pláštěů pneumatik).

Druhá z metod je založená na odrazu ultrazvukových vln od vady v materiálu (obr. 1.2). Na rozdíl od předešlé metody se používá jen jedna sonda, která je vysílačem a zároveň i přijímačem odražených vln. Zcela tedy postačí jen jeden volný rovný povrch. Z předešlých výhod plyne nevýhoda, že vlny urazí dvojnásobně dlouhou cestu v porovnání s průchodovou metodou. Metoda není vhodná pro zkoušení tenkých materiálů.

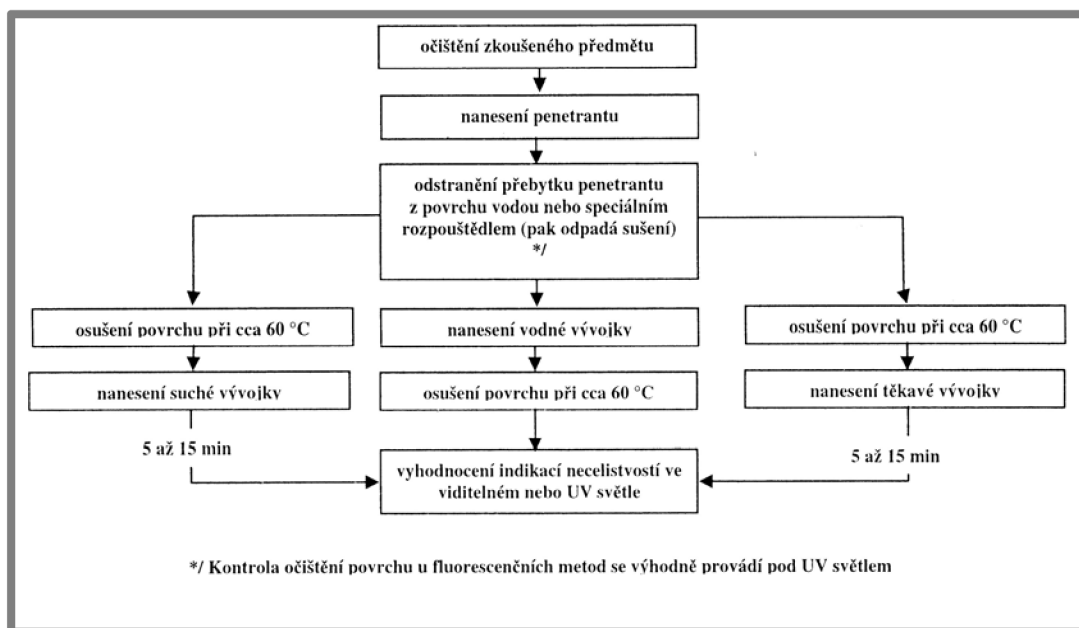


Obr. 1.2 Princip odrazové metody ultrazvuku [2]

1.1.3 Kapilární metody

Zkoušky používající kapilární metody se řadí mezi průkopníky nedestruktivního zkoušení. První provedené zkoušky tohoto typu se prováděly pomocí petroleje již začátkem 19. století. Kapilární metody spadají do kategorie povrchových metod, tedy vad jako například: porezity, studených spojů, trhlin, ... Moderní metody využívají látky, které se neřývají penetranty. Penetranty rozumíme kapaliny, které se nanášejí na povrch materiálu. Vnikají do povrchových vad, následným vztlínáním indikují vady. Následně pomocí vývojky vytvoří barevnou stopu vady na povrchu. Tato stopa vady se hodnotí vizuálně.[2]

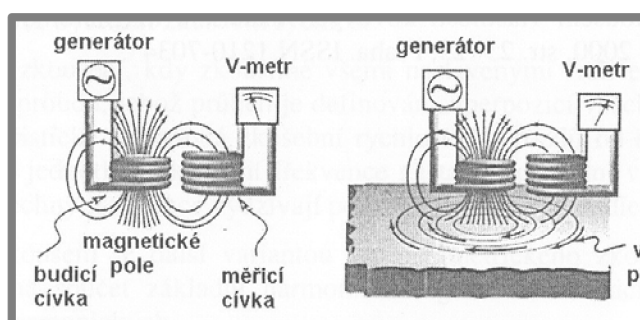
Následující schéma znázorňuje postup při aplikaci kapilárních zkoušek.



Obr. 1.3 Schéma normálního nebo emulgačního postupu [2]

1.1.4 Metoda vířivých proudů

Základ metody spočívá v principu elektromagnetické indukce. Metoda vířivých proudů při nedestruktivním zkoušení dílců je založena na tom, že daný objekt, který má danou elektrickou vodivost, magnetickou permeabilitu a přesně definované rozměry, se vystaví působení střídavého elektrického pole. Pole je indikováno budicí cívkou, která je napájena střídavým proudem. V objektu se indukují proudy, které leží v rovinách kolmých na vektor magnetické indukce. Tyto proudy se podle svého tvaru nazývají vířivé. Svým magnetickým účinkem zpětně působí na budící magnetické pole cívky. Tyto dva magnetické účinky se vektorově skládají do výsledného pole, které závisí na elektrické vodivosti a permeabilitě zkoušeného objektu. Na vinutí měřicího přístroje se tedy indukuje napětí ovlivněné magnetickými a elektrickými parametry zkoušeného objektu (obr. 1.4).[2]



Obr. 1.4 Princip metody vířivých proudů[2]

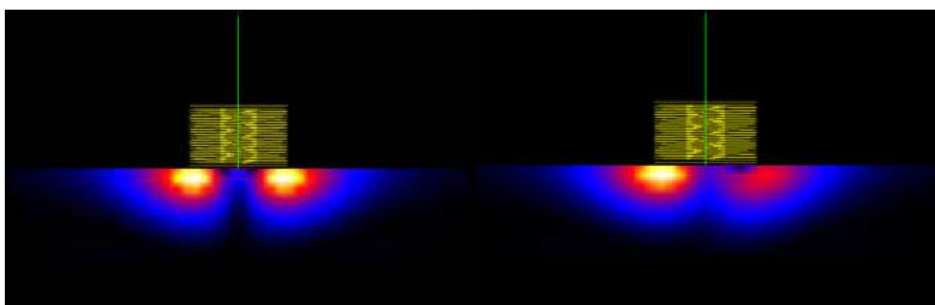
Metoda vířivých proudů je vhodná nejenom k detekci vad při porušení materiálů, jakými jsou trhliny, povrchové praskliny, poruchy svarů. Další využití nachází např.: při měření tloušťky laků, při měření tloušťek povrchových vrstev (po nitrinaci, po cementování), nebo také při kontrole mechanického napětí. [2]

Následující tabulka 1.2 uvádí hlavní výhody a nevýhody metody vířivých proudů.

Tab. 1.2 Výhody a nevýhody metody nedestruktivního zkoušení vířivými proudy[2]

Výhody	Nevýhody
Možnost měření při vysokých teplotách (za tepla válcované materiály)	Nemožná indikace vad hlouběji pod povrchem materiálu
Lehké a přenosné přístroje	Velká citlivost na rozměry součástí
Není potřeba nijak upravovat povrch	
Jedná se o bezkontaktní metodu	

Následující obrázek 1.5 ukazuje konkrétní aplikaci metody vířivých proudů na součásti. Vlevo bez vady, napravo je ukázka indikace povrchové vady.

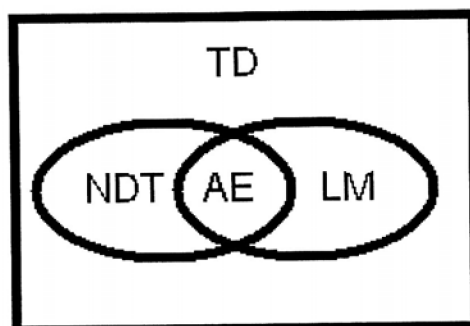


Obr. 1.5 Indikace vady na konkrétní součásti metodou vířivých proudů[8]

1.2 Teorie akustické emise

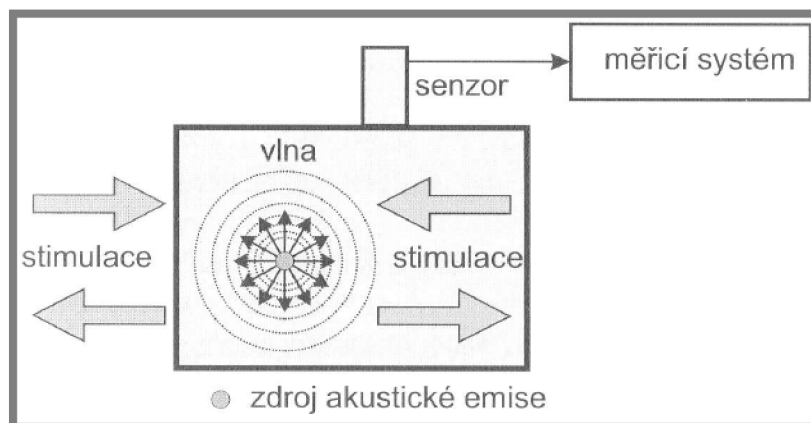
1.2.1 Charakteristika a princip akustické emise

Metoda akustické emise (dále jen AE) se řadí mezi metody NDT. AE je jedinou pasivní metodou v oblasti nedestruktivních zkoušek. To znamená, že nevysílá žádné mechanické ani elektromagnetické vlny do materiálu, ale detekuje vznikající a rostoucí vady uvnitř materiálu, tzv. aktivní poruchy. Jinými slovy jedná se o fyzikální jev, při kterém vzniká akustický šum, který doprovází plastickou deformaci. Pojem AE se rozumí postup, který zahrnuje metodu detekce akustické emise, následující elektronické zpracování získaného signálu a výsledné hodnocení ze získaných dat. Počátky AE jsou datovány v 50. letech 20. století. Základy položil německý fyzik Joseph Kaiser. Metoda prochází postupným vývojem. Již se nepoužívá jen k detekci jevů vyvolaných plastickou deformací, ale i k jiným procesům, kterými mohou být: narušování materiálů konstrukcí, netěsnost a úniky médií držených pod tlakem, tření, obrábění, svařování, různé typy výrobních postupů, ... [2]



Obr. 1.6 Vztah mezi technickou diagnostikou (TD), NDT a AE [2]

Princip AE je patrný z obrázku 1.7. Pokud je struktura zatěžována a vzniká trhlinka, stává se zdrojem šíření elastické vlny. Předpoklad šíření počítá s kulovou vlnou, která se šíří do všech směrů stejnou rychlostí. Když tato prostorová vlna dosáhne povrchu materiálu, vytvoří povrchovou vlnu. Jejich frekvence se pohybují od 10^4 Hz do 10^6 Hz a amplituda elastických vln dosahuje velmi malých hodnot obvykle od 10^{-12} do 10^{-5} metru. Snímače (piezoelektrické, viz dále) připevněné na povrchu materiálu detekují vlnění. Během cesty vlny k snímači dojde k útlumu, odrazům a rozptylu. Dalším krokem je transformace mechanického vlnění na povrchu na elektrický signál. Následuje úprava signálu elektrickou cestou, a to zesílení a filtrace. [2]



Obr. 1.7 Princip AE [7]

1.2.2 Specifika akustické emise

Pro určení polohy zdrojů AE se používají vícekanálové systémy. Metoda akustické emise je mezi metodami NDT specifická, jak znázorněno v tabulce 1.3.

Tab. 1.3 Vlastnosti metody akustické emise [3]

Přednosti	Omezení
vzdálená detekce a lokalizace trhlin	struktura musí být zatížena
měřicí systém je rychle nastavitelný	aktivita AE je vysoce závislá na materiálu
vysoká citlivost	malé informace o druhu trhliny
postačuje omezený přístup ke zkoušené struktuře	výklad výsledků může být nejednoznačný
určení aktivních trhlin	rušivý elektrický a mechanický šum může interferovat s měřením

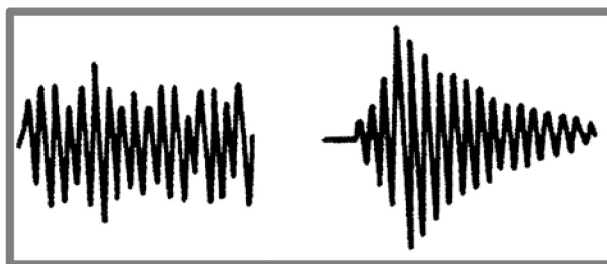
Významnými faktory odlišující metodu AE od ostatních druhů NDT jsou hlavně: detekce pohybu defektů (není určen jejich tvar), AE vyžaduje namáhání konstrukce, malá citlivost na geometrii součásti, může testovat celou konstrukci současně, ovšem je citlivá na různé okolní šумы pozadí.[2]

Signálům AE od různých zdrojů odpovídají různá frekvenční pásma[3]:

- Makroskopické defekty: od 0,1Hz do 100Hz
- Střední velikost defektů: od 100Hz do 10kHz
- Mikroskopické defekty: od 10 kHz do 10MHz

1.2.3 Událost akustické emise

Je fyzikální jev, který způsobuje akustickou emisi, může jím být: posun dislokací, vznik mikrotrhliny, ... Reprezentuje ji jednotlivý fyzikální dynamický ráz. Detekováním jednotlivých rázových vln vznikají jednotlivé hity elektrického signálu (obr. 1.8). Hity mohou tvořit buď jednoduchou posloupnost (nespojité signál), nebo překrývající se posloupnost (spojitý signál).[3]



Obr. 1.8 Spojitý signál (vlevo) a praskavý signál AE (vpravo) [3]

Nespojitá AE (obr. 1.8 vpravo)

Nespojitý signál AE je vyvolán časově oddělenými událostmi trvajícími několik málo milisekund až nanosekund. Typickým představitelem tohoto typu signálu je trhlina v materiálu, která se s časem mění. Popis signálu viz kapitola 1.3.

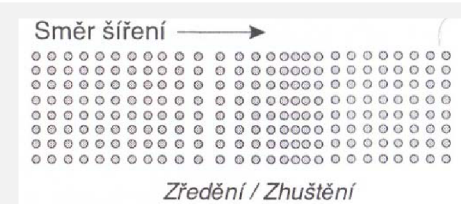
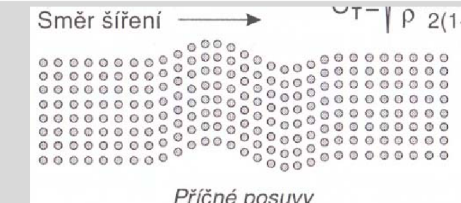
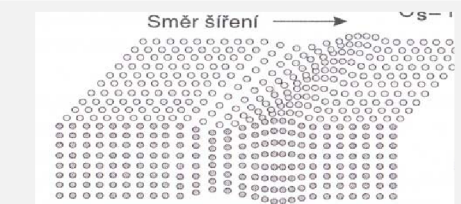
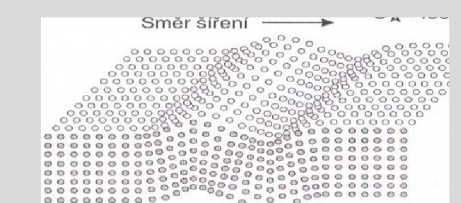
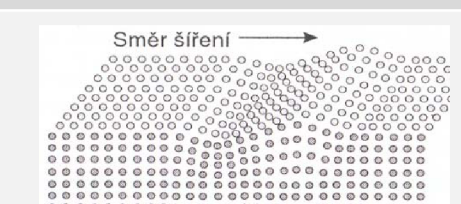
Spojité AE (obr. 1.8 vlevo)

Spojité signál AE je vyvolán událostmi, které nejsou časově odděleny. Často vzniká z fyzikálních jevů, kterými mohou být kavitace, nebo plastická deformace, únik kapaliny z potrubí a jiné. Popis a vyhodnocení signálu viz kapitola 1.3.

1.2.4 Vlny

Materiál lze pro zjednodušení z mikroskopického pohledu považovat za soustavu částic elasticky spojených. Pokud v součásti vznikne defekt, projeví se tak, že z místa této vady putuje elastická vlna, která je zachycena snímači na povrchu struktury. Typy a charakteristiky vln udává následující tabulka 1.4. Je ovšem idealistické hodnotit reálné chování struktury jen jedním typem vlny. Protože materiály mají další podstatné vlastnosti, kterými jsou anizotropie, geometrické překážky a nehomogenní složení. Tím dochází ke kombinacím uvedených typů vlnění.[2]

Tab. 1.4 Základní typy vln [2]

Název	Popis	Schéma
Podélná vlna v tlusté desce	Materiál nedovoluje smrštění nebo roztažení v příčném směru.	
Příčná (smyková) vlna	Materiál dovoluje smrštění nebo roztažení v příčném směru	
Dilatační vlna v tenké desce - symetrická	Tenká deska dovoluje smrštění a roztažení ve směru kolmo na povrch desky.	
Dilatační vlna v tenké desce - antisymetrická	Tuhost ohybu dlouhých vln ve velmi tenké desce je velmi nízká (rychlost šíření je malá). Kratší vlnové délky se šíří jako vlny.	
Rayleighova vlna na povrchu tlusté desky	V případě ztenčování materiálu přechází v dilatační vlnu antisymetrickou.	

Rayleighova vlna vzniká pouze při umístění zdroje na povrchu respektive v malé houbce pod ním. Její průběh je bezdisperzní, tzn. tvar vlny se nemění, pouze klesá amplituda v závislosti na vzdálenosti od zdroje.

Difúzní akustické pole u malých těles

V případě malých těles kulové vlnoplochy, které vzniknou v materiálu od defektu, velice rychle narážejí do jiných povrchů. V praxi to znamená, že než dozní vybuzení snímače první vlnou dorazí k němu sada odrazů. Tento vzniklý šum všech odrazů se označuje jako difúzní akustické pole.[2]

Pokles intenzity vln signálu AE se vzdáleností od zdroje

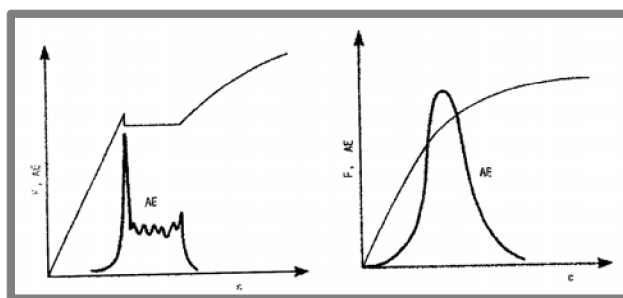
Velikost amplitudy akustického tlaku, která je nesena mechanickými vlnami, klesá se vzdáleností od zdroje. Útlum signálu AE se vzdáleností má zásadní vliv pro určení vzdálenosti, z níž lze zdroj detekovat. Existuje hned několik základních příčin proč intenzita a amplituda vln klesá. Těmito příčinami jsou: rozptyl energie, rozpad/disperze pulzu, ztráta energie (útlum), vliv dráhy. Příkladem takovýchto útlumu může být nádoba naplněná tlakovou kapalinou. Důležité je také poznamenat, že útlum u spojitě události AE bývá výrazně nižší než u signálu praskavé události AE.[2]

1.2.5 Zdroje AE

Nejčastějšími zdroji AE bývají vznikající trhliny, šířící se trhliny, lom, plastická deformace, pohyb dislokací, fázové přeměny, třecí mechanismy, ... Vybuzené signály mohou být spojitě nebo nespojitě. Co se týče dosažených maximálních amplitud vln, ty lze seřadit podle relativní velikosti vzestupně:

- dislokační pohyby,
- fázové přeměny,
- trhlinové útvary.

Pohyby jednotlivých dislokací není možné zaznamenat z důvodu nízké amplitudy, ovšem pokud se jedná o shluk více dislokací, které vytvářejí spojitý signál, ty už detekovat lze. Příkladem fázových přeměn je martenzitická přeměna u uhlíkových ocelí. Tření vzniká v trhlinách, kde dochází ke kluzu materiálu. Trhlinové a třecí signály jsou vhodné pro určení polohy trhliny. Trhliny vznikají u povrchu materiálu nebo vrubů nebo uvnitř struktury, kde překračuje lokální napětí lomové. Trhlinové útvary generují signály ve velmi vysokém tempu. Pro představu o vzniku signálu slouží obr. 1.9. V něm je zachycena tahová zkouška a zároveň průběh AE. [3]



Obr. 1.9 Znatelná i neznatelná mez kluzu je výrazná při sledování signálu akustické emise[3]

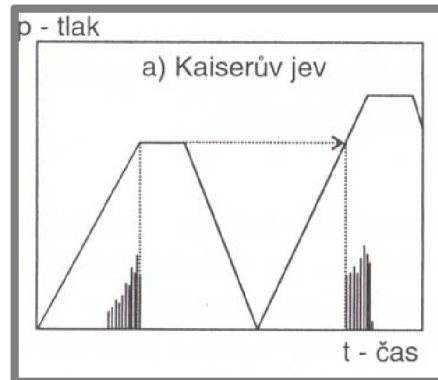
1.2.6 Kaiserův jev

Tento jev je charakterizován nevratností procesů, které jsou zdroji AE. Při zatěžování struktury dochází nejdříve k elastické deformaci. Až při následném překročení meze kluzu vznikají plastické deformace a tím i vlny nutné pro detekci

1.2.5

1.2.6

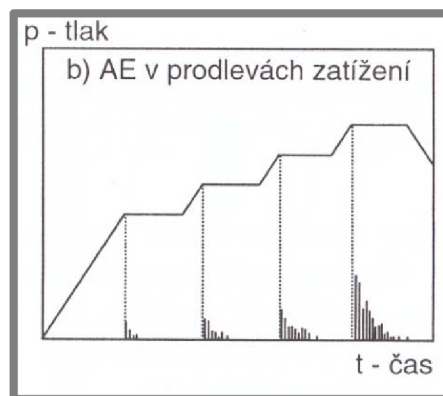
AE. Při opakovaném namáhání nebudou detekovány vlny do doby překročení předchozího zatížení.[3]



Obr. 1.10 Kaiserův jev[2]

1.2.7 AE v přerušení průběhu zatěžování

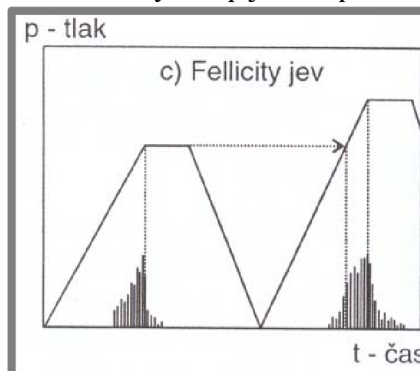
Pokud je struktura zatěžována rychleji, než je jeho schopnost relaxace napětí. Při zastavení zatěžování pokračuje plastická deformace a postupně doznívá s ní i signál AE (obr. 1.11). Toto doznívání v prodlevách zatěžování je nejčastěji způsobené výskytem koncentrátoru napětí (trhliny, jiné koncentrátoři). Výrazně delší doznívání znamená, že materiál má omezenou schopnost se zpevněním stabilizovat a tak zastavit další pokrok deformace a tím i pokračování signálu AE. [2]



Obr. 1.11 AE v prodlevách zatěžování [2]

1.2.8 Felicitního jev

Tento jev je charakteristický pro kompozitní materiály. Jedná se o porušení platnosti Kaiserova jevu, tím že k AE dochází již při nižších hodnotách zatížení než je maximum předešlého zatěžovacího cyklu. p je tlak při tlakové zkoušce nádoby.[2]

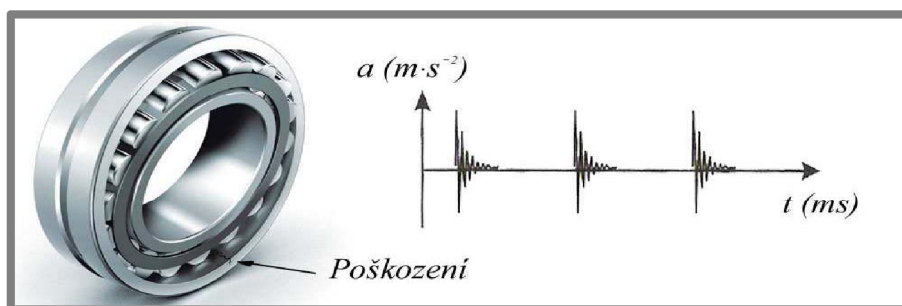


Obr. 1.12 Felicitního jev [2]

1.2.9 Použití akustické emise u cyklicky zatěžovaných materiálů

Metoda AE je výhodná také pro online diagnostiku cyklicky zatěžovaných součástí a to zejména valivých ložisek, u kterých se vyskytuje především praskavý signál AE. Ten je způsobený vznikajícími pittingy na dráze valivých elementů (obr. 1.13). S rostoucí dobou probíhajícího měření se zvyšuje amplituda i počet zdrojů AE. Na obrázku 1.13 níže je zobrazena závislost času t [ms] na zrychlení a [$m \cdot s^{-2}$]. Na vertikální ose je zrychlení z důvodu použití piezoelektrického snímače zrychlení.

Poškození valivých ložisek lze rozdělit do 4 fází dle závažnosti poškození. V první fázi se ložiskem šíří AE s frekvencí v řádech několika MHz. Ve druhé fázi se začíná objevovat první poškození ložiska. V této fázi dochází k prolínání různých složek spektra do událostí AE, proto se používají snímače zrychlení s vysokou vlastní frekvencí. Ve třetí fázi se již používají běžné snímače zrychlení. Rázy vznikají kontaktem poškozeného prvku s ostatními. Běžné frekvence rázů jsou v rozmezí 5 kHz až 20 kHz. S rostoucím opotřebením vzniká více harmonických složek ve frekvenčním spektru. Poslední čtvrtá fáze již znamená kritický stupeň poškození. Frekvence událostí AE se přesouvají do oblastí nízkých kmitočtů. Další provoz ložiska je již omezen pouze na několik hodin.[9]



Obr. 1.13 Pitting jako zdroj signálu AE[6]

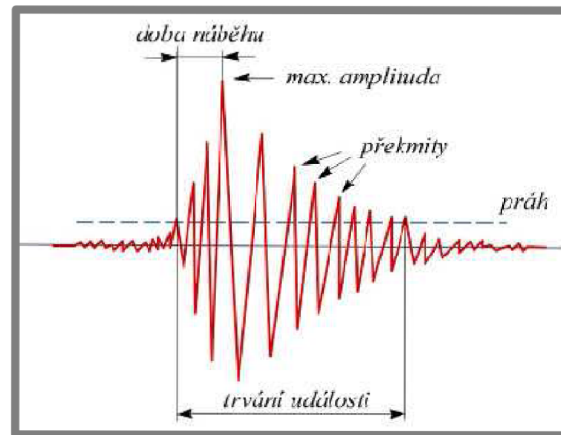
1.3 Popis a vyhodnocení signálu akustické emise

1.3.1 Popis signálu pomocí základních parametrů AE

Doba, kdy signál dosáhl a překročil prahovou hodnotu až do doby, kdy ji znovu nepřekročil, se nazývá **emisní událost (hit)**. Emisní událost charakterizuje analyzovanou část signálu AE. Na obrázku 1.14 je trvání emisní události vyznačeno.

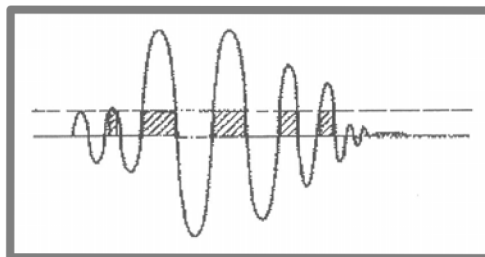
Parametry používané pro popis emisní události [3]:

- **Práh** – nastavená hodnota, definuje začátek a konec jednotlivých emisních událostí.
- **Počet emisních překmitů** – udává počet kmitů přes nastavenou prahovou hodnotu, emisní událost často obsahuje velký počet překmitů.



Obr. 1.14 Teoretický signál AE [5]

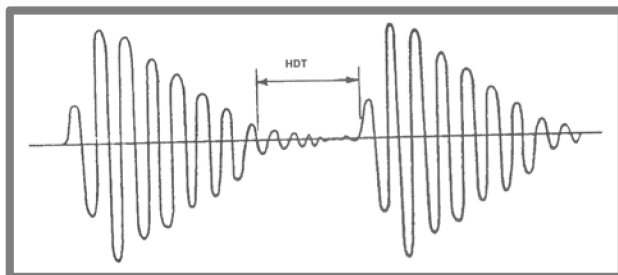
- **Počet emisních překmitů do maxima** – tyto překmitů určují strmost náběhu emisní události.
- **Amplituda emisní události** – je maximální výchylka emisní události.
- **Délka emisní události (trvání události)** – doba mezi prvním a posledním překročením prahové hodnoty.
- **Doba náběhu** – čas mezi prvním překročením prahu a maximální výchylkou. Využívá se k rozlišení zdroje signálu a jeho filtraci.
- **Energie emisní události** (obr. 1.15) – je úměrná ploše pod obálkou emisní události.



Obr. 1.15 Energie emisní události [3]

- **Průměrná frekvence** – poměr počtu emisních překmitů k času trvání emisní události.
- **Čas příchodu** – čas, kdy došlo k překročení prahové hodnoty.
- **Časový rozdíl** – jde o časovou diferenci téže emisní události jiným snímačem. Tento parametr může být využit pro lokalizaci zdroje AE.
- **Parametrické (pomocné) signály** – tyto signály mají souvislost se způsobem zatěžování, tzn. měřiče síly, tlaku, teploty, atd. Jsou dále převáděny na elektrický signál, který je ukládán s každou emisní událostí.
- **Průměrná hladina** – Tento parametr lze výhodně využít u spojitého signálu. Používá se při šterbinové detekci.

- **Mrtvý čas (HDT)** – určuje konec emisní události. Existují dva typy nastavení této veličiny. První možnost spočívá v nezahrnutí všech částí signálu AE (odraz, přímá vlna,...) do události AE. To znamená zvolení dlouhého mrtvého času. Ve druhé variantě jsou tyto části zahrnuty do události AE zvolením krátkého mrtvého času. Volba mrtvého času je komplikovanou záležitostí, závisí zejména na zkušenostech obsluhy. Vhodné hodnoty se z rozností materiálů liší.



Obr. 1.16 Mrtvý čas mezi událostmi AE [3]

1.3.2 Vyhodnocení signálu AE

1.3.2

Výsledný elektrický signál je vyhodnocován měřicím systémem AE. V moderní podobě se jedná o digitalizaci signálu a jeho následné zpracování. Existují různé úrovně vyhodnocení signálu.

Různé úrovně vyhodnocení parametrů signálu AE

V tabulce 3.1 znázorňují řádky počet měřicích kanálů a sloupce úrovně vyhodnocení. Ve směru šipek roste, jak cenová náročnost měřicího systému, tak i náročnost na obsluhu AE, která měření a vyhodnocení provádí.

Tab. 1.5 Závislost počtu měřicích kanálů na úrovni vyhodnocení signálu AE[2]

	informativní	standardní	Pokročilá
Jeden	1A	1B	1C
2 až cca 6	2A	2B	2C
mnoho	3A	3B	3C



Informativní úroveň

V tomto případě nás zajímá pouze přítomnost, nebo aktivita AE, popřípadě amplituda. Tato úroveň vyhodnocení je v řadě případů dostačující.

Standardní úroveň

Vyhodnocení spočívá v zjišťování základních parametrů elektrického signálu AE. Dalším možným popisem standardní úrovně je vyhodnocení v časové reprezentaci.

Pokročilá úroveň

(„Advanced Signal Processing“) - představuje vyhodnocení zcela digitalizovaného signálu AE.

1.3.3 Vícekanálová měření AE

1.3.3

V praxi se častěji setkáváme s vícekanálovým měřením AE. To znamená, že je použito více snímačů, respektive více měřicích kanálů současně. Tento způsob

měření nám umožňuje získat mnohem komplexnější informace pro vyhodnocení. Například umožňuje buď orientační, nebo přesnou lokalizaci zdroje AE.

Základním principem je porovnání signálu stejného původu v odlišných místech detekce. Parametry signálu reflektují rozdílnost tras elastických napěťových vln od zdroje ke snímači AE. Je důležité, aby byly měřicí trasy pokud možno shodné. To znamená použití stejných snímačů, vlnovodů, předzesilovačů, měřicích kanálů, frekvenčního pásma měření.[2]

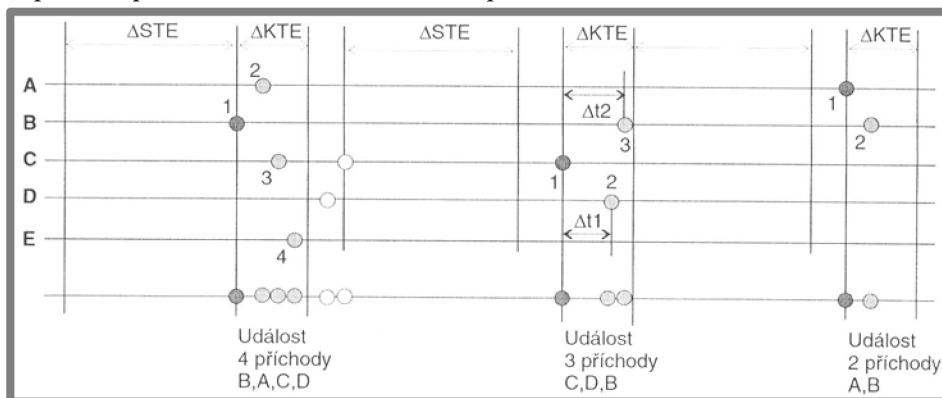
Detekce signálu v různých místech měřicí sítě vede:

- k rozdílu v časech příchodů
- k rozdílu v amplitudě signálů z různých snímačů
- k rozdílu doby trvání či náběhů
- k dalším změnám časově frekvenčního průběhu signálu AE v různých místech

1.3.4 Kompletace hitů (emisních událostí) do událostí AE

Stejně jako u jednorázového měření je hit oddělený dobou ticha, tak i kompletace hitů u vícekanálového měření je oddělena dobou ticha, signál se nachází pod prahem. Obrázek 1.17 názorně ukazuje kompletaci na 5-ti kanálech A, B, C, D, E. První událost předchází doba separace (ticha), tvoří ji hity na kanálech A, B, C, E. Následující dva hity jsou již mimo dobu kompletace. Obdobným způsobem jsou kompletovány i druhá a třetí událost.

Ne všechny shluky hitů se hodnotí jako událost AE. Obvyklým kritériem může být například počet hitů v dané době kompletace.

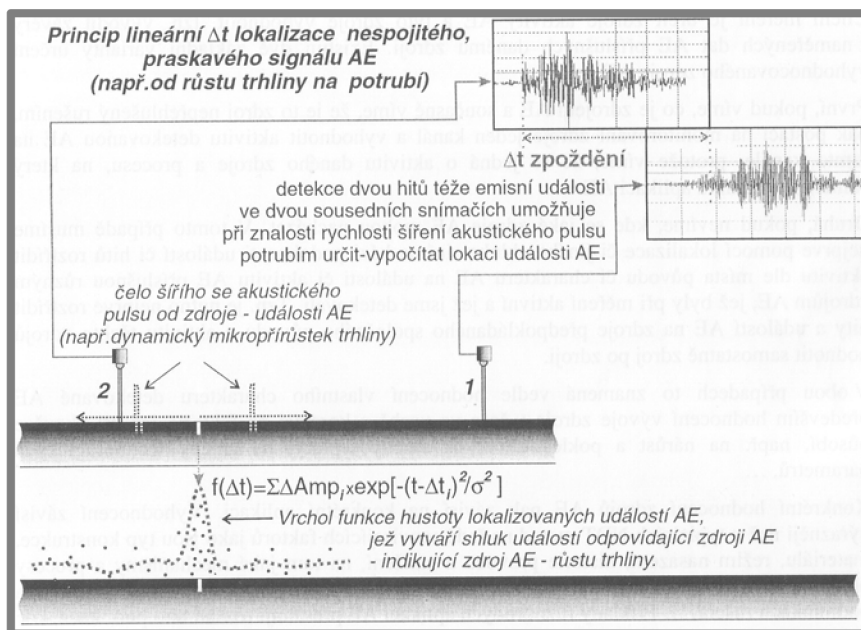


Obr. 1.17 Schéma kompletace emisních událostí u vícekanálového měření[3]

1.3.5 Lokalizace událostí AE

Nejjednodušším příkladem lokalizace událostí AE je lineární lokalizace (obr. 1.18).

Jak je patrné z obrázku, signál směřující k pravému snímači bude oproti snímači nalevo opožděn o Δt . Poloha zdroje lze vypočítat při známé rychlosti šíření AE. Pokud detekujeme větší počet událostí a vyneseme jejich polohu do grafu v závislosti na amplitudě, v okolí jistého bodu začne docházet ke shlukování bodů. To nám ukáže polohu defektu (zdroje).



Obr. 1.18 Princip lineární lokalizace událostí AE[2]

Obdobně lze provést plošnou respektive prostorovou lokalizaci.

1.3.6 Vyhodnocení zdrojů AE

1.3.6

Cílem měření akustickou emisí je určit zdroje AE. Existují dva základní typy vyhodnocování:

- první případ je takový, že poloha zdroje je známá. V tom případě postačuje na monitoring jeden kanál.
- druhý případ je takový, kdy není poloha zdroje známa. V tomto případě je nutno nejprve pomocí lokalizace roztrždit aktivitu pomocí podobnosti hitů podle místa původu a charakteru. To znamená nejprve roztrždit hity událostí AE na zdroje předpokládaného společného původu a jednotlivé zdroje hodnotit jeden po druhém.

Konkrétní vyhodnocení AE v případě provozních kontrol má charakter klasifikace závažnosti jednotlivých zdrojů.

- Zdroj nezávažný
- Zdroj potenciálně závažný
- Zdroj závažný

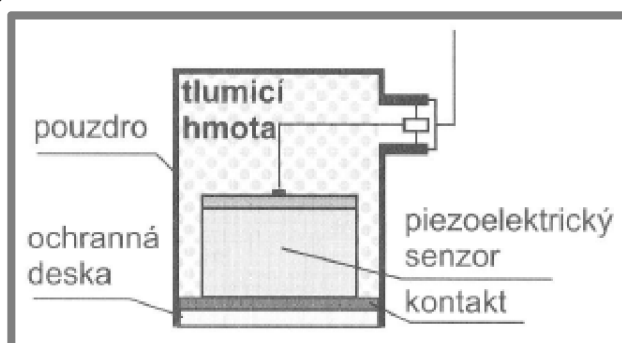
Uvedená klasifikace je pouze ilustrativní, v různých aplikacích může vypadat jinak[2].

1.4 Měřicí zařízení

1.4

1.4.1 Snímače

1.4.1



Obr. 1.19 Schéma piezoelektrického snímače [3]

Typickými snímači sloužícími k převodu mechanického vlnění na elektrický signál jsou piezoelektrické snímače. Ty pracují na principu piezoelektrického jevu, kdy při deformaci piezoelementu dochází ke vzniku elektrického napětí. V co nejkratší vzdálenosti musí následovat předzesilovač. Předzesilovač bývá často součástí snímače. Charakteristiky snímače určuje jeho kalibrace. Vlastnosti snímače definuje poměr elektrického signálu a vstupní mechanické vlnění.

Mezi další typy snímačů patří kapacitní snímače. Deformace, která je následkem vlny od zdroje AE se na snímači projevuje tak, že mění vzdálenost mezi deskami nebo plochu desek. V současné době pokračuje vývoj laserových snímačů, které vynikají zejména svojí vysokou citlivostí.

1.4.2 Způsoby upevnění snímačů

První variantou připevnění snímače je přímo na povrch. Čelo snímače je přitlačeno přes vazelinu k povrchu součásti. Významný vliv na citlivost potom mají hladkost a rovnost povrchu. Druhá možnost spočívá v upevnění snímače přes vlnovod. Tento způsob se využívá u součástí, jejichž povrch je horký.

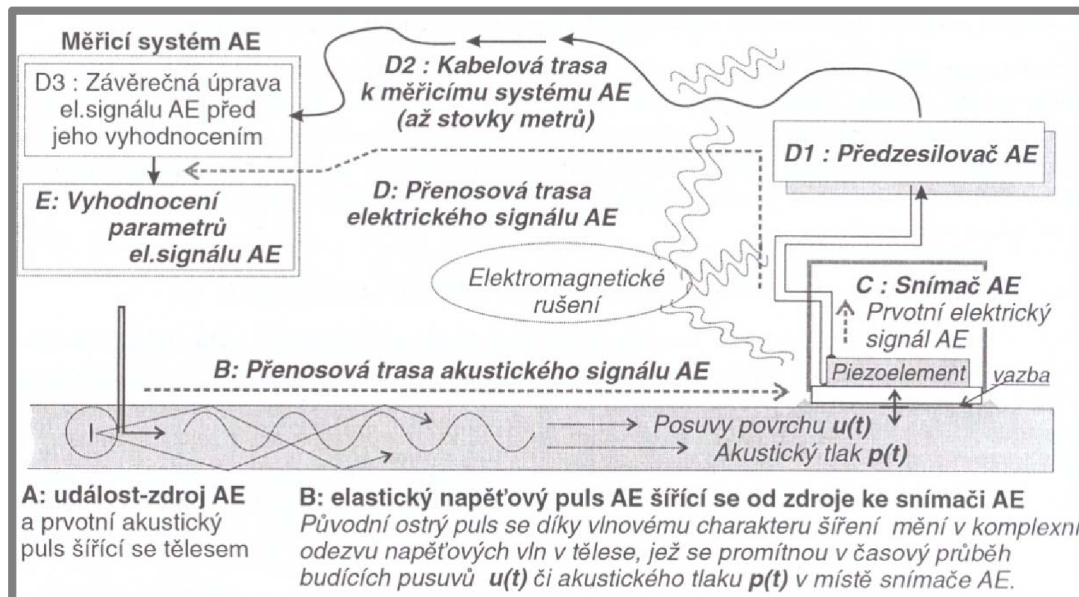
1.4.3 Kalibrace snímačů

Absolutní kalibrace snímačů

Citlivost snímače je dána poměrem změřené odezvy v napětí ve Voltech na buzení v metrech (popř. Pascálech – akustický tlak). Vyskytuje se zde ovšem problém, že buzení ani odezva snímače nejsou jedno číslo, ale jsou to časové průběhy. Při absolutní kalibraci se proto vychází ze záznamu elektrického signálu jako odezvy na δ puls budící mechanické veličiny. Odezvu na δ puls představuje přenosovou funkci.

1.4.4 Uspořádání měřicí techniky

Měřicí trasa: Snímač, Předzesilovač, Kabelová trasa, Zařízení pro zpracování signálu.



Obr. 1.20 Schéma přenosové trasy signálu AE[2]

Popis obrázku 1.20:

D1) předzesilovač

D2) přenos elektrického signálu kabelem do měřicího systému

D3) zpracování signálu

Podstatnou ovšem negativní složku měřicí trasy tvoří elektromagnetické rušení.

1.4.5 Předzesilovače

1.4.5

Z důvodu vzdálenosti někdy stovek metrů mezi snímačem a měřicím systémem, je nutné použití předzesilovače. Dalším důvodem je velmi nízké napětí, které vzniká na piezoelektrickém snímači. Z těchto důvodů se elektrický signál zesiluje, tím se přizpůsobuje měřicímu zařízení AE.

1.4.6 Kabelové trasy

1.4.6

Jak již bylo zmíněno, kabelové trasy jsou vedeny často na vzdálenosti několik stovek metrů, za požadavku přenosu beze ztrát a deformací signálu. S rostoucí délkou kabelů roste útlum signálu. Z toho důvodu se nejčastěji používají koaxiální kabely. Neméně důležitou věcí je pokud možno vedení kabelových tras mimo ostatní elektrické trasy, což je prevence před elektromagnetickým rušením.

1.4.7 Úprava signálu v měřicím systému před vyhodnocením

1.4.7

Elektrický signál je potřeba před zpracováním digitalizovat. Ještě před digitalizací se provedou poslední analogové úpravy:

- Závěrečná frekvenční filtrace signálu
- Závěrečné zesílení či utlumení signálu AE

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

Zadáním této diplomové práce je analýza signálu AE při cyklickém zatěžování součástí užitím dostupných softwarových prostředků. Předchozí kapitola shrnula všechny základní předpoklady a znalosti z oboru nedestruktivního zkoušení metodou akustické emise. Dnešní aplikace metody v praxi spočívají hlavně na diagnostice součástí a konstrukcí v provozu. To znamená, že jejím úkolem je monitorovat stav a případné závady, které by mohly znamenat možné nehody, predikovat včas. Akustická emise se nepoužívá jako samostatná metoda, ale v kombinaci s jinou metodou nedestruktivního zkoušení.

2.1 Vybrané aplikace metody akustické emise

Dnešní aplikace akustické emise jsou téměř ve všech případech orientovány na průběžný monitoring provozu konstrukcí. Nejtypičtější aplikací metody akustické emise je monitoring úniku tlakového média, kterým mohou být kapalina nebo plyn v zásobnících nebo různých jímkách. V těchto případech lze využít i metody lokalizace zdrojů akustické emise a poměrně s vysokou přesností určit polohy těchto zdrojů na vnějších površích zásobníků (obr. 2.1). Na obrázku 2.1 jsou dále vidět



Obr. 2.1 Aplikace akustické emise na tlakové nádobě s připevněnými snímači AE na povrchu[4]

připevněné snímače na povrchu válce. Další obdobnou aplikací jsou snímače monitorující stav transportního potrubí pro různé typy médií (obr. 2.2). V tomto případě je možný monitoring potrubí na velkou vzdálenost. Diagnostická stanice umožňuje bezdrátový přenos dat, tím umožňuje obsluze získávat data z více kontrolních míst současně. To znamená, že v případě poruchy na potrubí lze určit místo úniku média.



Obr. 2.2 Aplikace akustické emise na transportním potrubí [4]

2.2 Reálné pracovní podmínky

2.2

Na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství v Brně jsou laboratoře pro zkoušení kontaktní únavy, které jsou vybaveny např. zařízením Axmat, které slouží pro simulování reálného axiálního ložiska pomocí kontaktu valivých elementů a vnitřního a vnějšího kroužku ložiska. Toto zařízení bylo dovybaveno o metodou akustické emise. Do čelistí zařízení Axmat lze upnout i reálné axiální ložisko. S problematikou této diplomové práce souvisí také zkušebna ložisek, ve které je umístěno 20 stanic s označením SA67 pro zkoušky trvanlivosti ložisek (obr. 2.3). Původně stanice používala pouze metodu vibrační diagnostiky, kdy byl stroj nastaven na určitou hladinu vibrací. Při dosažení této hodnoty se stroj zastaví. Tento způsob byl v dnešním měřítku nepřesný a nespolehlivý, protože vznik a vývoj poškození nelze sledovat ani popsat. Z těchto důvodů bylo zařízení upraveno i pro metodu akustické emise. To umožnilo získávat data v digitální podobě. Což již umožňuje následnou analýzu získaných dat v kancelářských podmínkách (postprocessing).



Obr. 2.3 Zkušebna ložisek v dílnách Ústavu konstruování

V oblasti výzkumu a vývoje probíhají práce na aplikování metody akustické emise do různých směrů technické praxe, jako například zkoušení ložiskových materiálů, atd. Tyto typy zkoušek se provádí na zařízení nazývaném AXMAT, kde se simuluje zatížení v axiálním ložisku, nebo se přímo zatěžuje konkrétní axiální ložisko (Obr. 2.4).

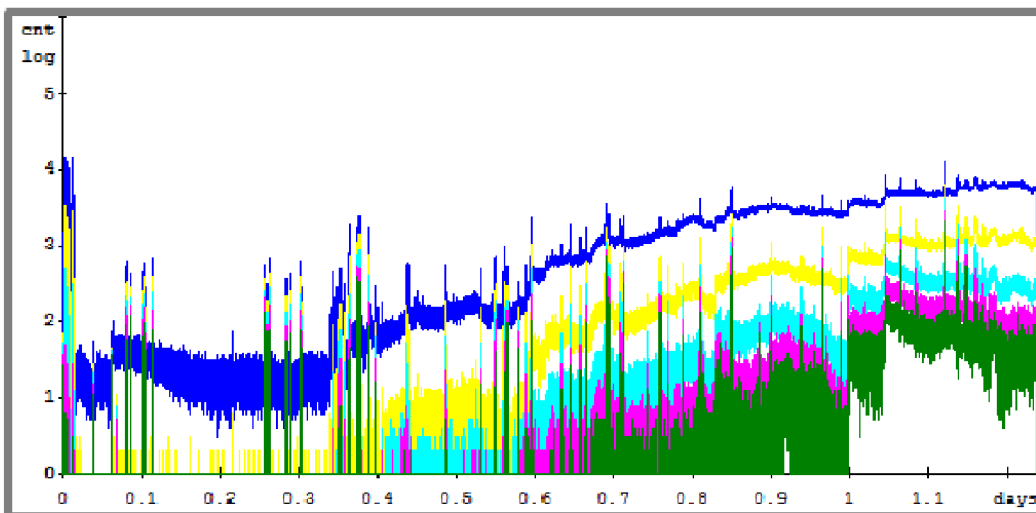


Obr. 2.4 Stanice Axmat v dílnách Ústavu konstruování

Tato metoda získávání dat je přímo spojená s tématem této diplomové práce, protože digitální data získaná na základě měření trvanlivosti ložisek budou sloužit jako podklad pro následný postprocessing a kategorizaci signálu AE při cyklickém zatěžování součástí konkrétně ložisek.

2.3 Výzkumná činnost v oblasti zpracování signálu AE

Data, která jsou získána ze zkoušek, slouží pro popis degračních procesů součástí. Tím může být například vznik pittingu u ložisek a jeho jednotlivé fáze.



Obr. 2.5 Reálný záznam signálu AE získaný při zkoušce ložiska

Co se týče samotného signálu a popsání emisních událostí v jednotlivých fázích zkoušky, tento problém zatím není významněji popsán. Úkolem mé diplomové práce bude právě analyzovat naměřená data a pokusit se o hlubší analýzu signálu na úrovni jednotlivých emisních událostí. Jako zdroj pro analýzu slouží data ze zkoušek simulovaného ložiska z materiálu diskového tvaru a reálného axiálního ložiska, které budou sloužit i pro porovnání obou variant zkoušek. Závěrem bych chtěl říci, že je snaha posunout metodu akustické emise směrem k dokonalejší interpretaci výsledků z digitálního záznamu. Například identifikovat typ zdroje emisní události pomocí frekvence, nebo jejího trvání, atd. Provedené postupy a analýzy by mohly sloužit jako doplnění současného doktorského tématu v oblasti cyklické kontaktní únavy, které má za cíl určit míru využitelnosti metody akustické emise v technické praxi.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem této diplomové práce bude podrobnější analýza signálu akustické emise. Pomocí dostupného softwaru se pokusit vytvořit určité skupiny jednotlivých událostí AE, jinými slovy kategorizovat je. Jako podklad pro analýzu budou sloužit data ze zkoušek trvanlivosti vzorků vyrobených z ložiskového materiálu a reálného axiálního ložiska. V práci bude snaha o analýzu signálu AE na úrovni jednotlivých emisních událostí.

Dalším cílem, který jsem si stanovil pro práci, je provést analýzu použitím systému Matlab, nebo jiného pokročilého matematického softwaru pro exportované binární textové soubory ze systému DaeShow. Z důvodu toho, že funkce softwaru DaeShow jsou v tomto směru značně omezené.

V závěru práce bude snaha naznačit případné další postupy v problematice, které mohou být řešeny v navazujícím doktorském tématu. Stejně tak jako problémy, které se vyskytly během řešení práce a mohou být vyřešeny např.: případnou úpravou zkoušecí stanice a podobně. V neposlední řadě je nutné poznamenat, že všechny dané postupy a vyslovené závěry vedou ke snaze ověření použitelnosti metody akustické emise při diagnostice ložisek.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4

4.1 Realizované zkoušky

4.1

Prvním krokem pro to, aby bylo možné analyzovat signál AE podrobněji, bylo nutné získat vhodná digitální data z reálného experimentu. Pod pojmem vhodná myslím v této situaci data získaná z takových zkoušek součástí, u kterých víme, jak se daná struktura chová během procesu únavového poškození. V tomto konkrétním případě se jedná o zkoušky trvanlivosti axiálních ložisek. Zkouška u ložisek se vyznačuje například dobře patrnou dobou záběhu a ke konci zkoušky tvorbou pittingů.

4.1.1 Zkoušené součásti

4.1.1

Jako zkoušené součásti bylo nejprve použito několik vzorků vyrobených z různých materiálů ve tvaru disků pro simulované axiální ložisko (obr. 4.1). Více vzorků bylo zkoušeno z důvodů osvojení si problematiky testování ložisek metodou akustické emise a odzkoušení měřicího systému. Ze souboru dat byl nakonec zvolen vzorek s označením C1, z důvodů dobře patrných pittingů vzniklých v kontaktní stopě a dobře čitelného digitálního záznamu s jasně patrnými fázemi únavového života, v neposlední řadě také z důvodu dobře zvolených stupňů citlivosti a úrovně filtrace. Vzorek s označením C1 byl zkoušen pod axiálním zatížením 3000MPa. Materiál vzorku byla litina 422456. Doby zkoušek se výrazně lišily v závislosti na použitém materiálu. Doba zkoušky u vzorku C1 byla 1 hodina 47 minut, v tomto čase byla zkouška ukončena limitními vibracemi. Hlavně na začátku zkoušek se kontrolovala teplota vzorků a ložiska, proto aby nedošlo k výraznému teplotnímu nárůstu, který by mohl v krajním případě znamenat změny v chování materiálové struktury, což je nepřijatelné. Průměr disků byl 21 mm a tloušťka 10 mm. Plochy, které sloužily pro odvalování kuliček, byly broušeny.



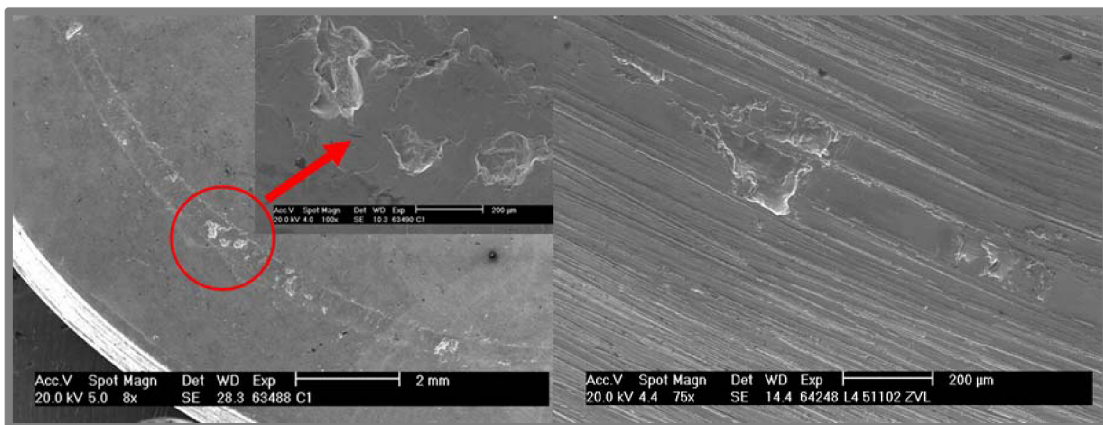
Obr. 4.1 Ukázka vzorku diskového tvaru s únavovým poškozením v kontaktní stopě viditelným pouhým okem

Data ze vzorků měla sloužit hlavně k porovnání s daty ze zkoušky reálného axiálního ložiska. Jednalo se o ložisko výrobce ZVL. Typ ložiska: L4 51102. Velikost zatížení na ložisku 2000N. Zkouška byla ukončena po 54 hodinách a 2 minutách. Tato data byla hlavním pokladem pro následný postprocessing.



Obr. 4.2 Axiální ložisko ZVL

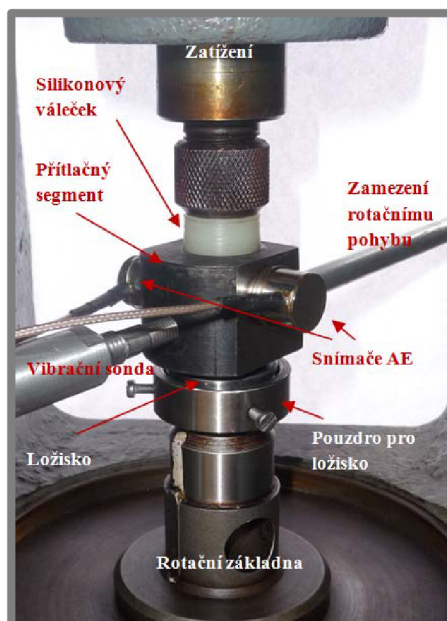
Po ukončení zkoušek byly vzorky a ložisko podrobeny analýze poškození na mikroskopu. Ukázkou únavového poškození v kontaktní stopě na vzorku C1 zachycuje obrázek 4.3. Poškození na reálném axiálním ložisku ZVL je ukázáno také na obrázku 4.3 vpravo.



Obr. 4.3 Ukázka únavového poškození (pittingu) vlevo na zkušebním vzorku C1 a vpravo na reálném ložisku ZVL

4.1.2 Podmínky zkoušky a měřicí technika

Zkoušky byly realizovány na zkušebním zařízení Axmat, které v minulosti sloužilo jen na zkoušky trvanlivosti ložisek. V současné době jsou stanice doplněny o možnost aplikace metody akustické emise. Zkoušky ložiskových materiálů a reálného ložiska probíhaly pod přetížením, z důvodu toho, aby byla zkouška realizovaná v podstatně kratším čase, než v jakém by trvala při běžném provozním zatížení. Hodnota zatížení se nastavuje pomocí závaží a jeho polohy na páce. Jako limitující faktor pro konec zkoušek sloužila limitní hodnota vibrací, která byla způsobená vzniklým opotřebením, zejména pittingem. V celém průběhu zkoušky se měřila aktuální teplota vzorků a ložiska, aby nedošlo k přílišnému zahřátí a poškození vzorků, popř. ložiska.



Obr. 4.4 Stanice Axmat

Na obrázku 4.4 je zachycena jedna stanice Axmat připravená ke zkoušce simulovaného axiálního ložiska pomocí styku 21 kuliček se zkoušeným materiálem ve tvaru disku.

Pro záznam zkoušky sloužil diagnostický systém od firmy DAKEL. Jednalo se o kontinuální sběr dat. To znamená, že digitální data ze zkoušky byla zaznamenávána za sebe bez vypnutí sběru dat. Důvodem bylo urychlení práce. V postprocessingu byly jednotlivé zkoušky vybrány pomocí časového filtru. Analyzátor DAKEL – XEDO (obr. 4.5) se skládá z boxu, který je možno rozšířit pomocí různých měřících a komunikačních karet. K měření byla k dispozici komunikační karta XEDO - FE, která využívá standardního ethernetového rozhraní pro připojení k PC. Následné zpracovávání signálu probíhalo na PC pomocí softwaru DAKEL Deamon. Boxy obsahují také karty pro vyhodnocování parametrů akustické emise XEDO – AE. Tyto karty slouží k připojení snímačů. K jedné měřicí kartě lze připojit jeden snímač. Měřicí karta dále obsahuje 16 bitový digitální signálový procesor. Od firmy DAKEL, která poskytuje komplexní řešení v oblasti diagnostiky metodou akustické emise, byly i použité snímače, které se připojují k měřicí kartě



Obr. 4.5 Analyzátor DAKEL - XEDO

pomocí koaxiálního kabelu. Snímače jsou upevněny magneticky k povrchu čelistí, ve kterých je upnutý vzorek. Jednalo se o snímače piezoelektrické, které v kombinaci s měřicím systémem umožňují detekovat emisní aktivitu na 16-ti úrovních citlivosti. Při každém měření se používala dvojice snímačů, a to zejména z důvodu toho, když by jeden ze snímačů přestal detekovat signál.

Dalším znakem provedených zkoušek bylo použití dvou stejných vzorků pod dvěma různými zatíženími na dvou stanicích současně. To protože nebyly známy přesné materiálové charakteristiky a nebylo jasné, jak se daný materiál bude pod zatížením chovat.

4.2 Postprocessing

Po provedení dostatečného počtu zkoušek následovala nejjobsáhlejší a nejdůležitější etapa této diplomové práce, kterou bylo zpracování získaných digitálních dat. Získaná data ze zkoušky lze přenést na libovolný jiný počítač, a data zpracovávat bez připojené měřicí techniky. Program Daemon ukládá měřené veličiny do výstupních souborů v binárním tvaru. Obsah souboru není nijak omezen jménem ani koncovkou tohoto souboru a uživatel může jak název, tak i koncovku. Pro následné zpracování takovýchto souborů slouží program DaeShow, který je součástí softwarového balíku spolu s programem Daemon.

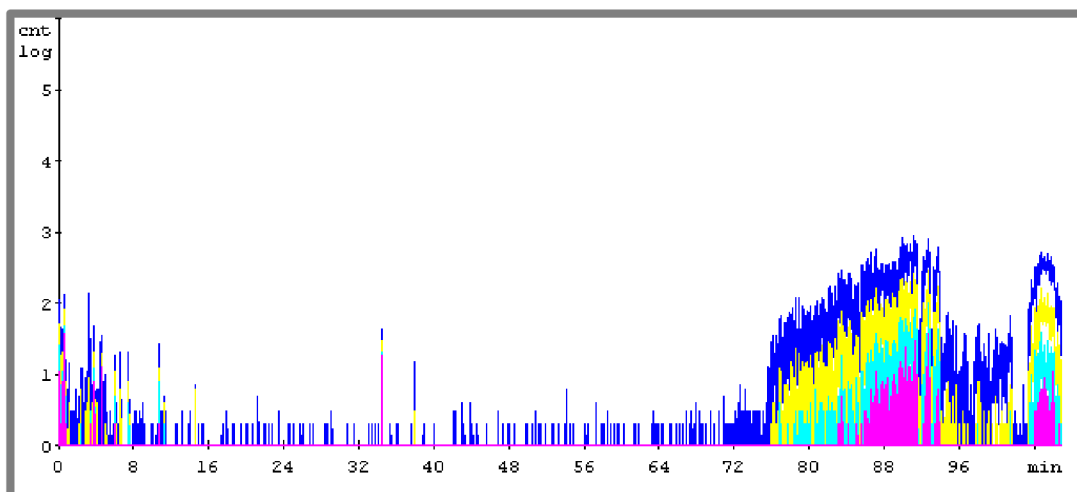
Program DaeShow je určen k postprocessingu, tedy zpracování signálu po měření. Mezi základní funkce patří tvorba časových grafů. Na x-ové ose je zobrazen čas. Časovou osu lze specifikovat pomocí časového filtru, nebo pomocí políčka „celý rozsah vybrané položky“ zobrazit celý průběh získaného signálu. Časový graf umožňuje zobrazení více y-os pro různé veličiny.

Konkrétní kroky v postprocessingu jsem rozdělil do tří úrovní zpracování signálu akustické emise. Úroveň informativní, která vede pouze k určitému obecnému pohledu na průběh únavového života součásti nebo konstrukce. Druhá úroveň slouží k identifikaci fází únavového života ložiska A třetí úroveň se snaží identifikovat druhy poškození na úrovni jednotlivých emisních událostí.

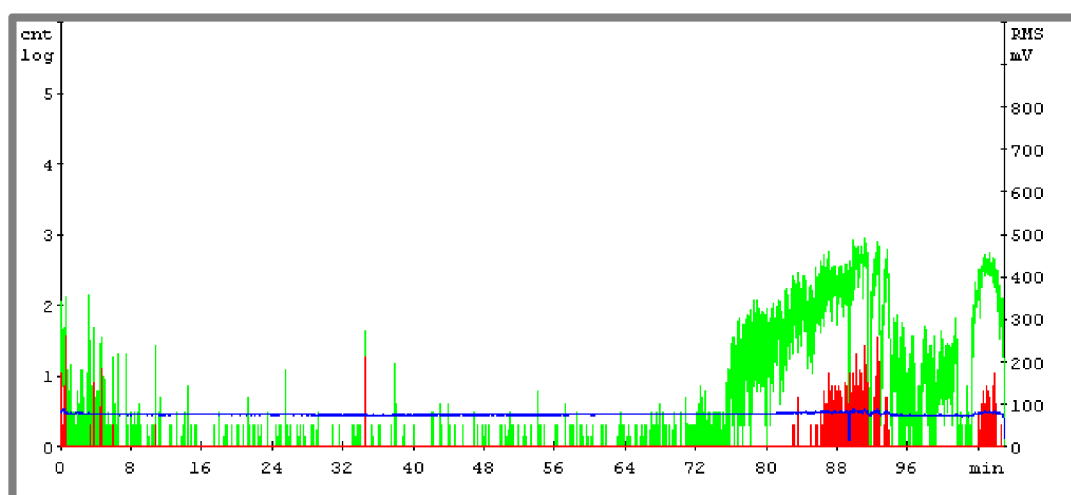
Cílem postprocessingu byla snaha dostat se k analýze na úrovni jednotlivých emisních událostí. A každá ze zmiňovaných úrovní znamenala postupné přiblížení k cíli postprocessingu.

4.2.1 První úroveň zpracování signálu - informativní

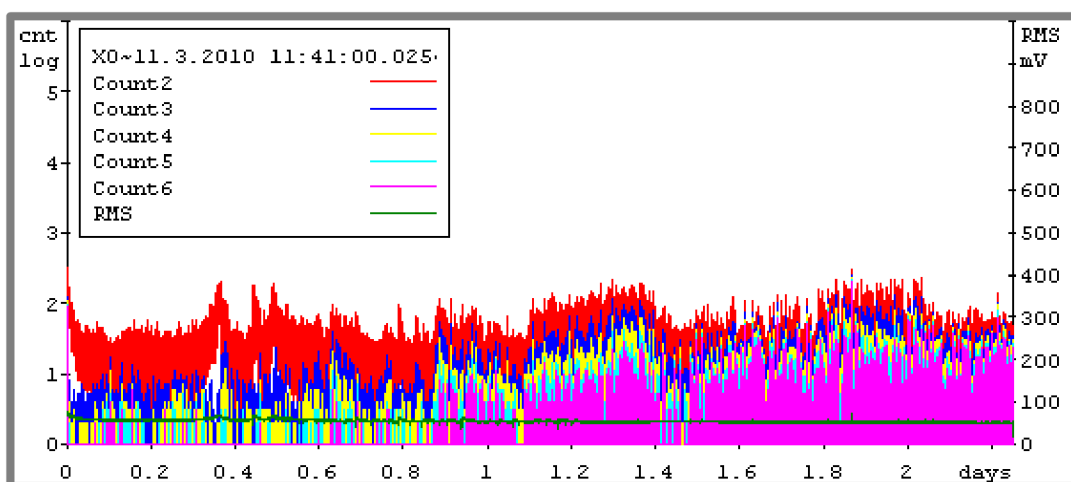
Následující grafy na obrázcích 4.6, 4.7 jsou získány ze zkoušek vzorků materiálů při simulování axiálního ložiska a ze zkoušky reálného ložiska (obr. 4.8). Na úrovni informativní se jedná o počty překmitů přes nastavenou prahovou hodnotu. Na této úrovni jsem srovnal data ze zkoušky vybraného vzorku a vybraného ložiska. Díky tomu jsem zjistil podobnost v únavovém životě obou součástí. Například jasně patrný záběh na začátku obou zkoušek, který se projevuje postupným poklesem počtu překmitů, dokud nedojde k vyrovnání výrobních nerovností a v případě vzorků k vytvoření kontaktní stopy. Další podobnost je dobře pozorovatelná během vzniku prvního únavového poškození, kdy dojde k výraznému nárůstu počtu překmitů. Poté v obou případech následuje fáze provozu s únavovým opotřebením, kdy se počet překmitů drží na přibližně konstantní hodnotě. Všechny grafy na obrázcích 4.6, 4.7 a 4.8 jsou vytvořeny pomocí softwaru DaeShow. Tvorba časových závislostí počtu překmitů, počtu emisních událostí a střední kvadratické odchylky signálu (RMS) patří mezi základní funkce programu DaeShow.



Obr. 4.6 Záznam počtu překmitů přes nastavenou prahovou hodnotu s různými stupni filtrace na prvním snímači u vzorku C1



Obr. 4.7 Záznam počtu překmitů a RMS u vzorku C1

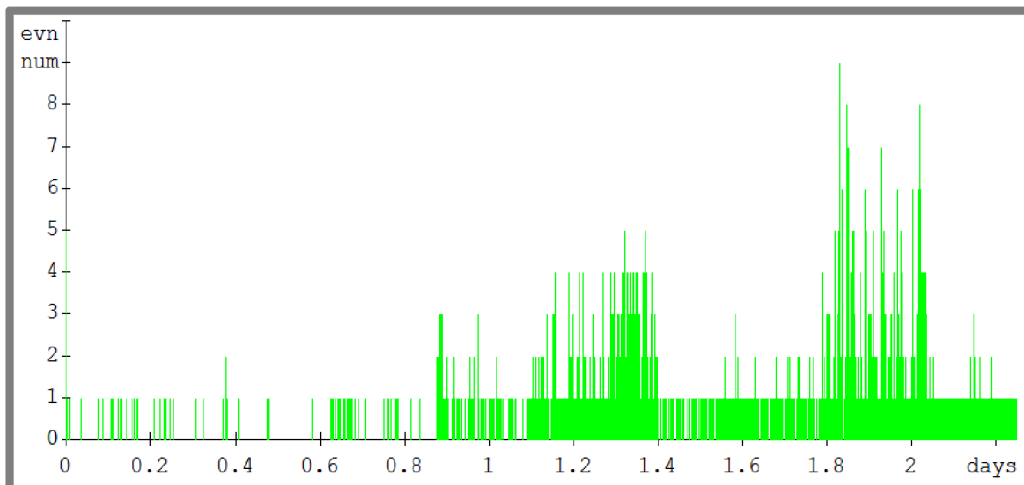


Obr. 4.8 Záznam počtu překmitů přes nastavenou prahovou hodnotu s různými stupni filtrace na prvním snímači u axiálního ložiska výrobce ZVL

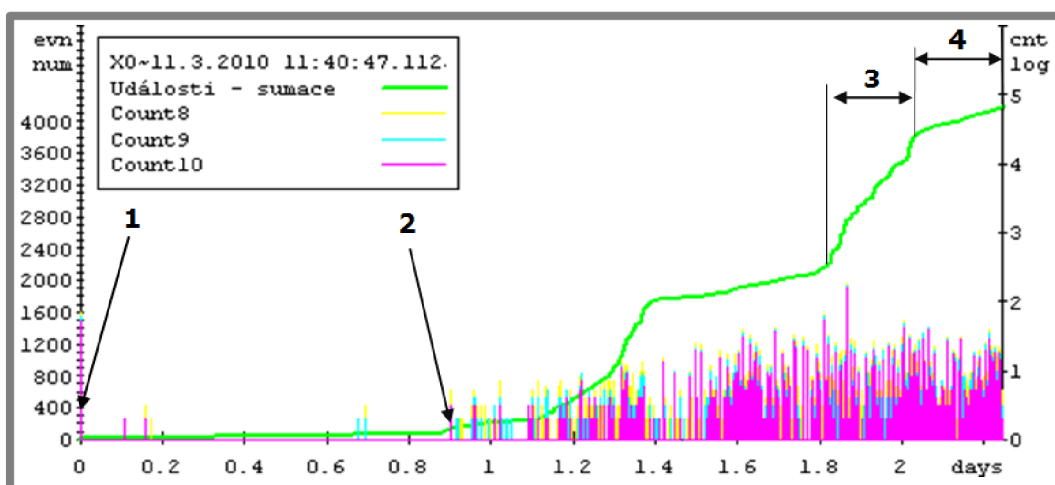
Diagnostický systém prostřednictvím použitých snímačů od firmy DAKEL dokáže zaznamenávat počty překmitů na 16-ti hladinách o různých stupních filtrace. Na grafech jsou úrovně citlivosti odlišeny různými barvami a uživatel si může zvolit, které hladiny bude chtít zobrazit. Do grafu lze zobrazit hodnotu RMS – střední kvadratickou hodnotu signálu (obr. 4.7 a 4.8).

4.2.2 Druhá úroveň zpracování signálu – identifikace fází únavového života ložiska

Další možností u tvorby časových grafů je zobrazení počtu událostí v závislosti na čase zkoušky (Obr. 4.9). U této volby je možné zahrnout možnost zobrazit sumační grafy (Obr. 4.10). To znamená, že v každém okamžiku není zobrazena aktuální hodnota, nýbrž součet aktuální hodnoty a předchozích hodnot. Následující dvojice grafů je vytvořena ze změřených dat na prvním snímači. Následující uvedené kroky v postprocessingu se již týkají pouze dat ze zkoušky ložiska ZVL. A to z důvodu toho, aby nevznikalo přílišné množství podobných grafů. Nicméně stejný postup, který bude následně směřovat až k analýze signálu na úrovni jednotlivých emisních událostí, lze aplikovat i na data získaná ze zkoušek simulování axiálního ložiska pomocí vzorku diskového tvaru.



Obr. 4.9 Závislost počtu emisních událostí na čase zkoušky získaná u vzorku C1



Obr. 4.10 Identifikace fází únavového života ložiska ZVL

Z grafu na obrázku 4.9 je patrný počet emisních událostí v konkrétních časech během zkoušky. Největší počty emisních událostí se objevují spolu se vznikem prvních únavových projevů – pittingů a v čase, kdy se ložisko blíží fázi limitních vibrací. Pod tímto grafem jsem úmyslně umístil graf (obr.4.10), aby si odpovídaly časové osy. Tímto srovnáním jsem specifikoval časové okamžiky a fáze, ve kterých dochází k výrazným změnám v signálu. Samotný graf (obr. 4.10) dává do souvislosti počet překmitů a sumační graf počtu emisních událostí. Sumační graf emisních událostí umožňuje získat jiný pohled na zkoušku z hlediska toho, ve kterých místech dochází k prudkému nárůstu počtu emisních událostí. Konkrétní fáze během provozu ložiska, které využiji k další analýze, jsem rozdělil do následujících kategorií:

4 fáze v únavovém životě ložiska:

1. záběh
(0h00min - 0h34min),
2. první poškození
(21h14min),
3. provoz s únavovým opotřebením
(42h59min-48h39min),
4. pásmo limitních vibrací
(48h39min-54h2min).

První identifikovaný úsek zobrazuje dobu záběhu ložiska. Během této doby dojde k vyrovnání výrobních povrchových nerovností (v případě vzorků dojde k vytvoření kontaktní stopy viz. obr. 4.1). Tím se výrazně sníží hlučnost simulovaného ložiska a zároveň se také uklidní, až zcela vymizí emisní aktivita. Tento děj je dobře rozpoznatelný zejména pomocí počtu překmitů přes nastavenou prahovou úroveň (countů). Naopak počet emisních událostí není v této oblasti zcela průkazným ukazatelem, protože nárůst počtu událostí v oblasti záběhu není příliš patrný.

Druhá fáze je reprezentována okamžikem, kdy dochází k prvnímu únavovému opotřebením, to je provázeno prvním viditelně výrazným nárůstem počtu emisních událostí i počtu překmitů.

Mezi mnou zvolenou druhou a třetí fází lze pozorovat ještě jeden úsek v provozu ložiska, který bych charakterizoval jako oblast, kdy dochází k určitému uklidnění v nárůstu počtu emisních událostí. To je nejspíš zapříčiněno postupným vyhlazováním prvních poškození. Tuto fázi jsem vyloučil zejména z důvodu nedostatečného pokrytí navzorkovaným signálem, tento problém bude ještě podrobněji rozebrán v následující kapitole.

Třetí fázi doprovází nejrazantnější nárůst počtu emisních událostí. Naopak počet překmitů nevzrostl výrazněji. Zdůvodněním pro tyto jevy je to, že ložisko se nachází ve fázi, kdy únavové poškození začíná značně ohrožovat jeho provoz. Během zkoušky bylo patrné i to, že se mění i zvukový projev ložiska. Toto chování bylo jasně pozorovatelné i u vzorků.

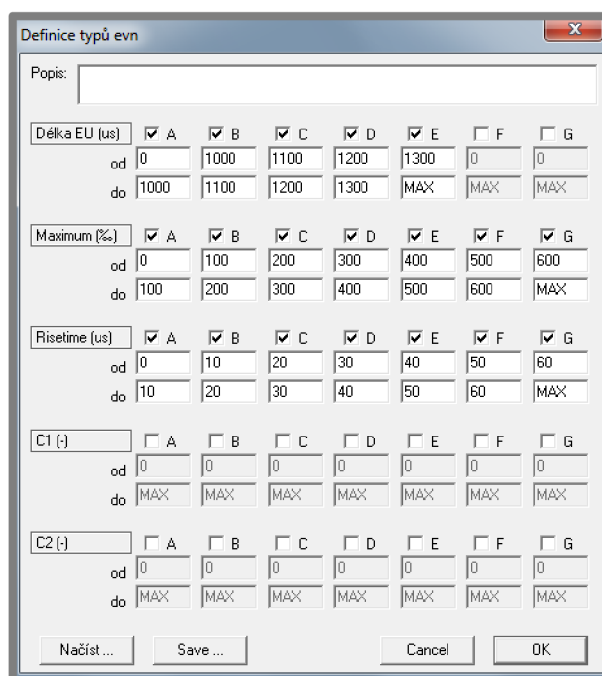
Poslední čtvrtá fáze představuje pásmo limitních vibrací, během kterého došlo k zastavení stanice. Poškození, které způsobilo limitní vibrace, může mít fatální následky pro ložisko, popřípadě celou konstrukci. Vibrační diagnostika je schopna detekovat až tuto fázi únavového života ložiska. Z toho lze usoudit, že metoda akustické emise umožňuje daleko včasější varování na stav daného ložiska případně

konstrukce. Podstatou limitních vibrací je vznik větších pittingů. Oddělený materiál se dostává mezi stykové plochy valivých elementů a kroužků ložiska.

Kategorizace signálu AE

Do druhé úrovně zpracování signálu jsem zpracoval i tuto etapu řešení v postprocessingu. Vycházel jsem z názvu této diplomové práce, a cílem bylo vytvořit určité kategorie emisních událostí podle některých z jejich základních charakteristických parametrů.

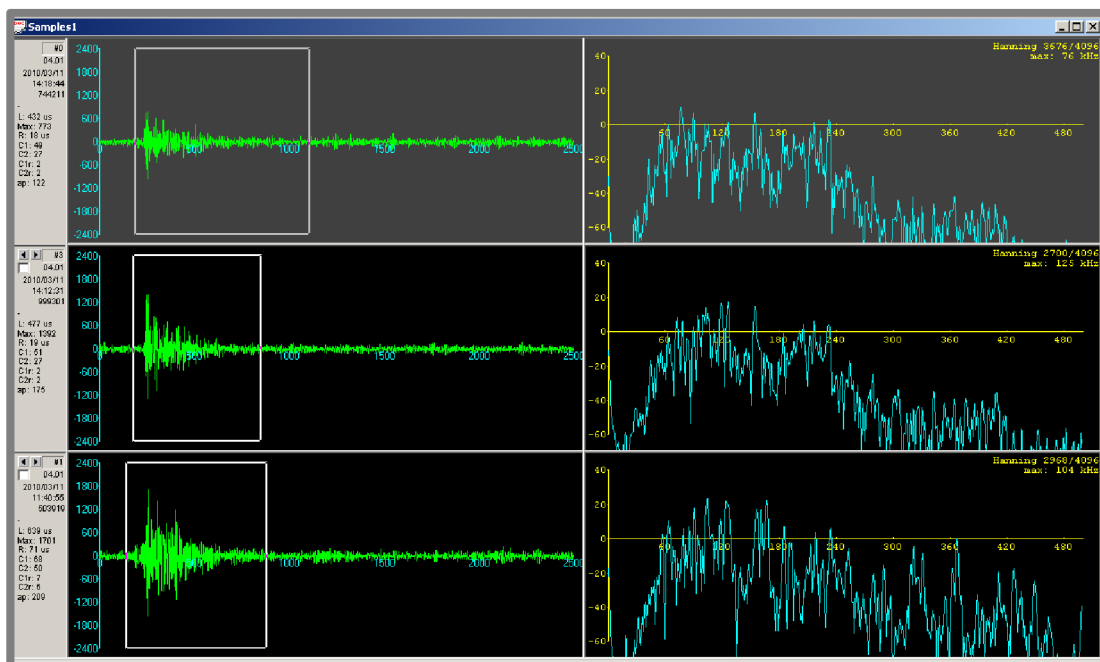
Veškeré grafy týkající se této kategorizace jsem vytvořil v prostředí programu DaeShow. Software DaeShow umožňuje během načítání definovat parametry pomocí kterých lze emisní události třídit dle různých kritérií (obr. 4.11). Těmi jsou: délka emisní události [μs], doba náběhu [μs], maximum [mV] a jiné. Jednotlivé typy emisních událostí lze označit písmeny A-G. Výsledné kategorie různých typů událostí jsou zobrazeny v kapitole 5.1 v části nazvané Analýza a interpretace získaných poznatků



Obr. 4.11 Práce v programu DaeShow – definice typů emisních událostí

4.2.3 Třetí úroveň zpracování signálu - analýza vzorků signálu

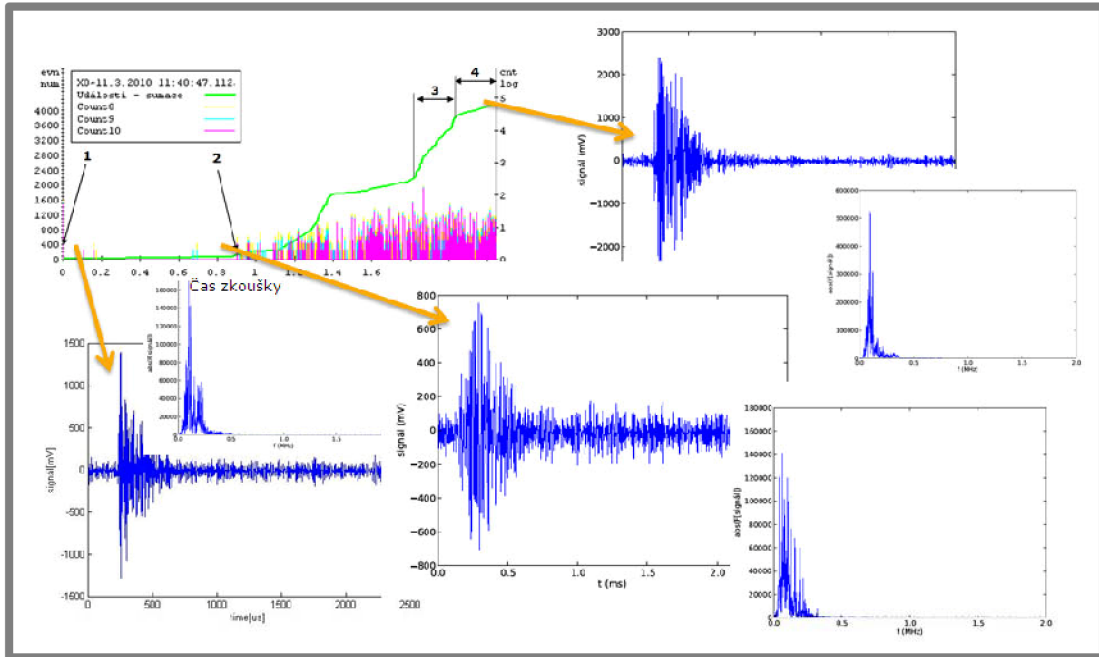
Analýza na této úrovni v této diplomové práci znamená základní rozbor navzorkovaného signálu. Zmíněný základní rozbor jsem provedl ještě v prostředí programu DaeShow (obr. 4.12), které umožňuje signály nejen prohlížet, ale také ukládat do databáze, nebo zobrazit transformaci signálu z oblasti časové do oblasti frekvenční. Tím se objevuje největší problém, který vznikl během postupných kroků s cílem identifikovat poškození na základě typů emisních událostí. Tento problém lze charakterizovat jako nedostatečný počet vzorků signálu pro možnou přesnou analýzu typu poškození.



Obr. 4.12 Práce s navzorkovaným signálem v programu DaeShow

První kroky na této úrovni zpracování signálu vedly k výběru souboru vzorků z jednotlivých fází provozu ložiska při zkoušce (obr. 4.13). Cílem bylo zjistit, jakým mechanismem jsou vzorky zaznamenávány. V neposlední řadě zjistit další možnosti v jejich možnostech zpracování. Dále bylo potřeba identifikovat ve vzorcích emisní události a jejich hlavní parametry.

Samotný postup při rozboru signálu probíhal tak, že se vzal určitý soubor vzorků signálu a provedla se jeho transformace z oblasti časové do oblasti frekvenční pomocí Fourierovy transformace. Od tohoto kroku byla další analýza provedena v pokročilém matematickém softwaru Matlab. Soubory vzorků se použily z důvodu jejich velkého množství. Časové oblasti pro výběr souborů vzorků byly voleny podle určitých kritérií. Jako podklad pro vhodné zvolení souboru konkrétních vzorků sloužila provedená analýza počtu překmitů (countů) přes nastavenou úroveň, nebo také sumační grafy emisních událostí. V obou případech závislosti byly voleny ty časové úseky, kde byla významná změna v počtu překmitů, popřípadě výrazný nárůst počtu emisních událostí (obr. 4.10).

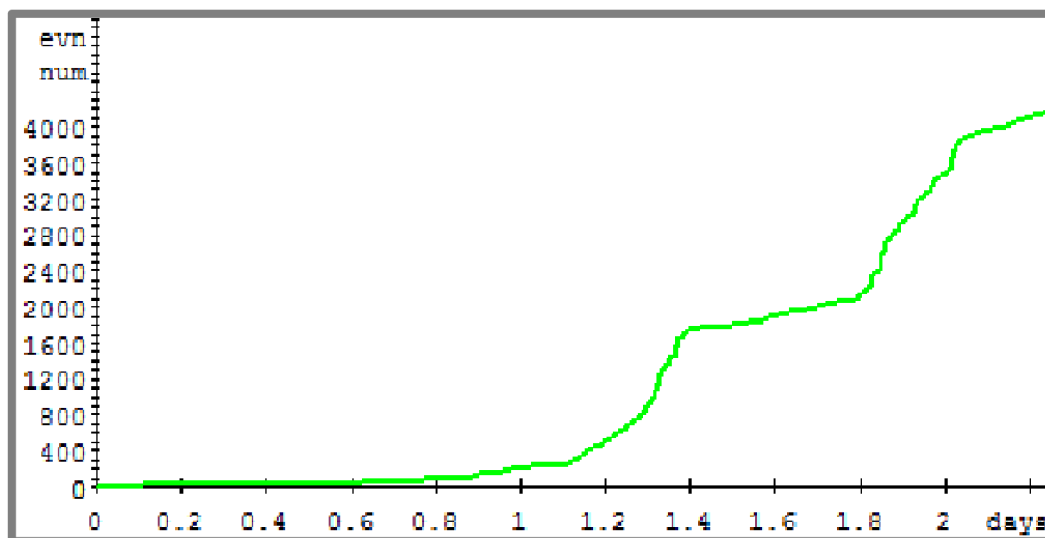


Obr. 4.13 Výběr reprezentativních vzorků ve fázích provozu ložiska

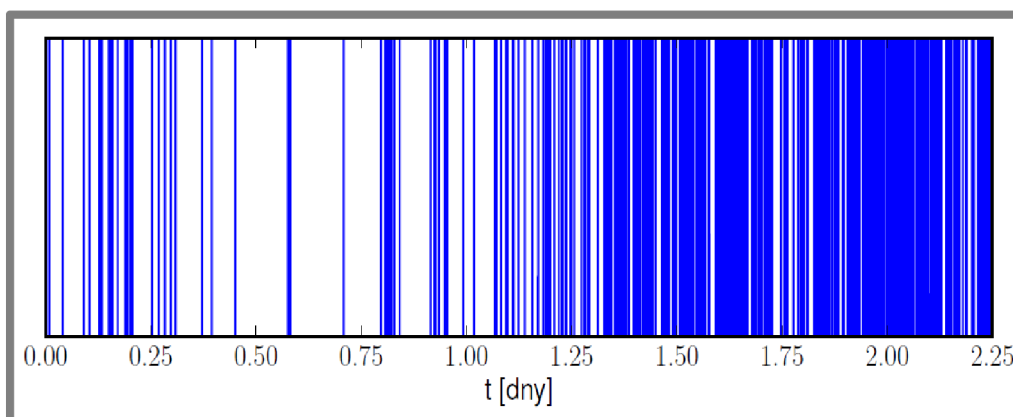
Pro dokonalejší popis zdrojů, které způsobují emisní události, je samozřejmě několik vzorků signálu nedostatečným množstvím. Zde se vyskytuje již jednou zmíněný problém v nedostatečném počtu vzorků. Nejideálnějším zdrojem pro tuto úroveň analýzy by byl kontinuální signál. Vzorky reprezentují časový úsek 2,5ms se vzorkovací frekvencí 4MHz. Maximální rozsah na ose y, která představuje měřené napětí je 2400mV, což představuje další problém, který zkresluje některé typy analýz provedených v dalším postupu, konkrétně se jedná o závislosti maximálních amplitud na čase zkoušky.

Jednou z cest pro pokračování se ukázala nutnost použití všech vzorků uložených během zkoušky ložiska ZVL. Konkrétní hodnota počtu vzorků je 935. To znamená poměrně velké zkreslení, vzhledem k nepravidelnosti ukládání vzorků. Nepravidelnost je zapříčiněna hlavně tím, že nejhustěji jsou vzorky pokryty ty oblasti, ve kterých se nachází největší počty emisních událostí, viz. grafy počtu emisních událostí (obr. 4.9). Naopak velmi řídké jsou zaznamenány vzorky a spolu s nimi emisní události po záběhu ložiska. Z toho vyplývá určité zkreslení oproti časové reprezentaci. Přesný pohled na hustotu obsazení vzorků v čase zkoušky dává obrázek 4.15. Pro dokonalejší představu o tom, kde se nacházejí hluchá místa, jsem ještě přidal obrázek 4.14 k porovnání. Jedná se o sumační graf emisních událostí.

Pro potřeby analýzy bylo nutné načíst celou dávku vzorků do softwaru Matlab, protože zde končily možnosti programu DaeShow. Jedinou cestou, jak toho docílit, byla možnost exportu vzorků do textových souborů. To ve výsledku znamenalo 935 textových souborů. Náhled vyexportovaného textového souboru a jeho struktury ukazuje obrázek 4.16. První řádky jsou informativní, obsahují informativní údaje o měření, jakými jsou například: prahová hodnota, nebo mrtvá doba. V dalším charakteristiky získaného vzorku: např.: čas konkrétního vzorku, nebo vzorkovací frekvence. Další řádky již obsahují konkrétní hodnoty napětí (mV). 10000 řádků odpovídá počtu hodnot napětí.



Obr. 4.14 Sumační graf počtu emisních událostí během doby zkoušky



Obr. 4.15 Rozložení vzorků signálu v čase zkoušky

Jedinou cestou, jak načíst dávku textových souborů, bylo vytvoření skriptu, který soubory dokáže načíst a následně z nich získávat data a charakteristiky. Prvním krokem tedy bylo načíst všech 935 vzorků, který každý obsahuje 10000 hodnot.

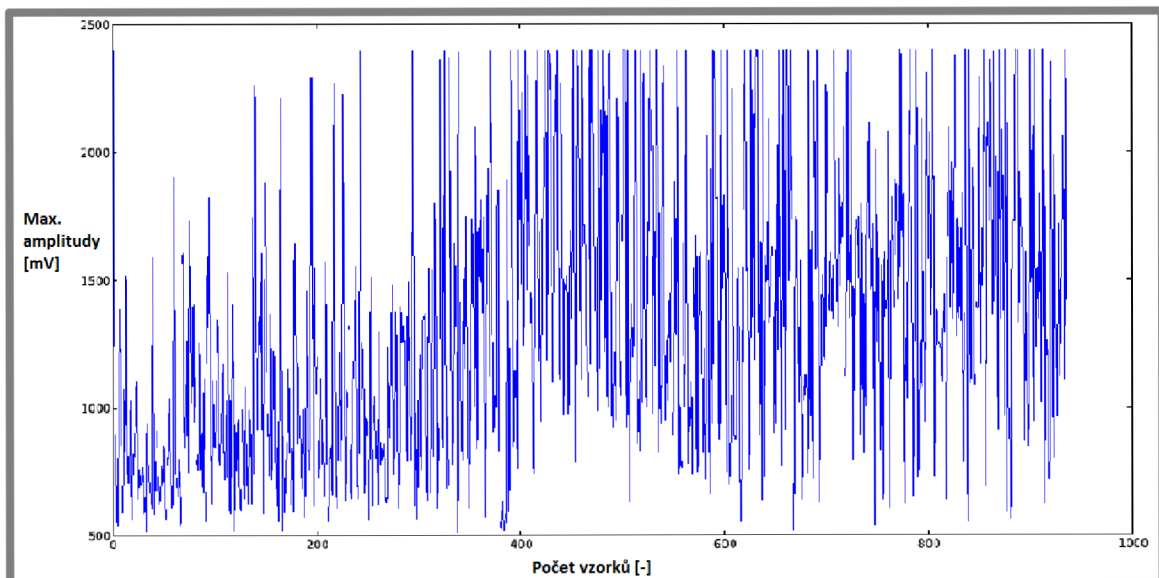
```

Smp - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
# signál AE jednotky 04.01
#
# konfigurace jednotky:
# zesílení g=10 [dB]
# maximální rozsah měření adc=2400 [mV]
# count prahy c1=358 [mV], c2=725 [mV]
# událostní prahy es=480 [mV], ee=432 [mV], mrtvá doba dt=992 [us]
# osciloskop trg=1685 [mV], pamět sm=10000 [slov], pretrigger pt=1000 [slov]
# osciloskop perioda pr=1000 [ms], timeout to=5000 [ms], vzorkování rt=4 [MHz]
# trigger zdroj ts=(TRG_EVENT), master tm=( )
# interval count ic=1000 [ms]
#
# hodnota 'cycle': 2010/03/11 11:00:00
#
# time = 2010/03/11 11:40:55.503919
# size = 10000 values
# rate = 4 MHz
# pretrigger = 1000 values
# source = 0x0002 (TRG_EVENT)
# forced = 0x0000 ( )
# values follow [mV]:
31
31
22
12
-5
-14
-29
-43
-62
-72
-82
-96
-103
-103
-103
-103
-101
-91
-86
-72
-62

```

Obr. 4.16 Ukázka části vyexportovaného textového souboru vzorku z programu DaeShow

Příkladem analýzy provedené pomocí takového skriptu může být například závislost maximální amplitudy na počtu vzorků (obr. 4.17). Zde je hlavním problémem již zmíněné zkreslení na časové ose, které se projeví zhuštěním závislosti.



Obr. 4.17 Závislost maximálních amplitud na počtu vzorků získaných během zkoušky

Obdobně lze zpracovávat i závislosti délek emisních událostí na počtu vzorků, případně dob náběhu na počtu vzorků. Tento výstup se mi zdál poměrně značně zkreslující, a proto jsem hledal cestu k jasnějšímu vyjádření změn hlavních parametrů emisních událostí během doby zkoušky.

4.2.4 Třetí úroveň zpracování signálu – zpracování zaznamenaných hlavních parametrů všech emisních událostí

4.2.4

Jako daleko vhodnější pro zobrazení a popsání dějů souvisejících se změnou hlavních parametrů emisních událostí se ukázalo získání exportovaného textového souboru (obr. 4.18), který obsahuje všechny zaznamenané emisní události a jejich základní parametry. Tento způsob je nejbližší snaze dosáhnout popisu poškození pomocí jednotlivých emisních událostí. Textový soubor byl opět načten pomocí skriptu, následně kresleny závislosti.

Všechny konkrétní závislosti získané tímto způsobem jsou shrnuty a popsány v kapitole 5.2.

```

Evn - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
# události AE jednotky 04.01
# formát řádku: čas začátku, délka [us], maximum [mv], rise time [us], c1 [count], c2 [count], risetime c1 [count], risetime c2 [count], vzorkována [+/-]
#
# konfigurace jednotky:
# zesílení g=10 [dB]
# maximální rozsah měření adc=2400 [mv]
# count prahy c1=358 [mv], c2=725 [mv]
# událostní prahy es=480 [mv], ee=432 [mv], mrtvá doba dt=992 [us]
# osciloskop tr=1685 [mv], pamět sm=10000 [slov], pretrigger pt=1000 [slov]
# osciloskop perioda pr=1000 [ms], timeout to=5000 [ms], vzorkování rt=4 [MHz]
# trigger zdroj ts=(TRG_EVENT), master tm=( )
# interval count ic=1000 [ms]
#
# hodnota 'cycle': 2010/03/11 11:00:00
#
2010/03/11 11:40:47.112543      2446800543      1341      2400      80      26      14      9
2010/03/11 11:40:47.117447      2446805447      1221      2362      12      19      9      1
2010/03/11 11:40:47.193803      2446881803      1124      895      41      11      5      4
2010/03/11 11:40:47.440683      2447128683      1163      528      174      9      0      6
2010/03/11 11:40:47.600247      2447288247      1859      754      1      5      1      0
2010/03/11 11:40:48.210682      2447898682      1171      763      52      9      1      5
2010/03/11 11:40:48.683162      2448371162      1105      734      11      4      1      1
2010/03/11 11:40:55.503919      2455191919      1223      1685      11      21      8      1
2010/03/11 11:42:11.644197      2531332197      1886      2400      152      121      89      19
# hodnota 'cycle': 2010/03/11 11:43:16
#
2010/03/11 11:43:53.364249      36724249      1173      715      80      3      0      2

```

Obr. 4.18 Ukázka části vyexportovaného textového souboru, který slouží jako podklad pro závěrečnou analýzu

V prvním kroku bylo potřeba jednotlivým emisním událostem přiřadit odpovídající souřadnici na časové ose. V dalším kroku se separovaly jednotlivé parametry emisních událostí a vykreslovaly se jejich závislosti v čase zkoušky. Celý postup tvorby skriptu je zachycen na obrázku 4.19.

```

from pylab import *

rc('text', usetex=True)

data = loadtxt("Evn.txt")

N = len(data[:,1])
time = zeros(N)

# nulovani data
for i in range(N):
    data[i,0] = data[i,0] - 11.

# prevod casun
for i in range(N):
    # na sekundy
    # time[i] = 24.*data[i,0]**60.**2. \
    #         + data[i,1]*60.**2. +data[i,2]*60. \
    #         + data[i,3]
    # na hodiny
    time[i] = data[i,0] + data[i,1]/24.\
              + data[i,2]/(24.*60.) \
              + data[i,3]/(24.*60.**2.)

# posuneme zacatek do casu t = 0
t0 = time[0]
for i in range(N):
    time[i] = time[i] - t0

# graf maxim
ticks = linspace(0.,2.25,10)
xticks(ticks)
xlabel(r"t [dny]")
ylabel(r'maxim\{a\}ln\{i\} amplituda EU [mV]')
J = 6
plot(time,data[:,J],color="#aaaaaa")
plot(time,data[:,J], 'r.', markersize=3)
xlim(0.0,2.25)
show()

# graf delek
# vynechat > 2400
time1 = []
data1 = []
for i in range(N):
    if data[i,5] < 2400. :
        time1.append(time[i])
        data1.append(data[i,5])

ticks = linspace(0.,2.25,10)
xticks(ticks)
xlabel(r"t [dny]")
ylabel(r'd\{e\}lka trv\{a\}n\{i\} EU [us]')
J = 5
plot(time1,data1,color="#aaaaaa")
plot(time1,data1, 'r.', markersize=3)
xlim(0.0,2.25)
ylim(1000.,2400.)
show()

# graf dob nabehu
ticks = linspace(0.,2.25,10)
xticks(ticks)
xlabel(r"t [dny]")
ylabel(r'doba n\{a\}b\{v\}e\{h\}u EU [S\mu s]')
J = 7
plot(time,data[:,J],color="#aaaaaa")
plot(time,data[:,J], 'r.', markersize=3)
xlim(0.0,2.25)
show()

```

Obr. 4.19 Program na import textového souboru z prostředí DaeShow

5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKÁNÝCH ÚDAJŮ

5

V předchozích kapitolách byla popsána metodika získávání dat a postupy při analýze konkrétních naměřených digitálních dat. Tato kapitola bude věnována interpretaci získaných výsledků a jejich analýze.

5.1 Kategorizace událostí akustické emise

5.1

Jednotlivé kategorie, které vznikaly tříděním emisních událostí, byly rozděleny podle významných parametrů, které slouží pro popis emisních událostí. První takovou kategorií tvoří rozdělení emisních událostí podle jejich délek trvání. Definice tohoto parametru byla provedena v kapitole popis signálu AE.

Číselné hodnoty v dialogu programu DaeShow (obr. 4.11) byly voleny tak, aby byly dobře zřetelné nárůsty jednotlivých typů emisních událostí (obr. 5.1). Výsledný sumační graf (obr. 5.1) ukazuje všechny typy událostí jinými barvami, tak jak udává tabulka 5.1. Zelená křivka s největšími hodnotami na ose Y ukazuje součet všech typů událostí. Z grafu je jasně patrné, ve kterých časech konkrétní typy emisních událostí vznikaly, nebo kde měly výrazný nárůst. Dá se říci, že koncové body křivek plní zároveň funkci histogramů. To znamená, že jde vidět, jaký počet jednotlivých typů emisních událostí se objevil během doby zkoušky.

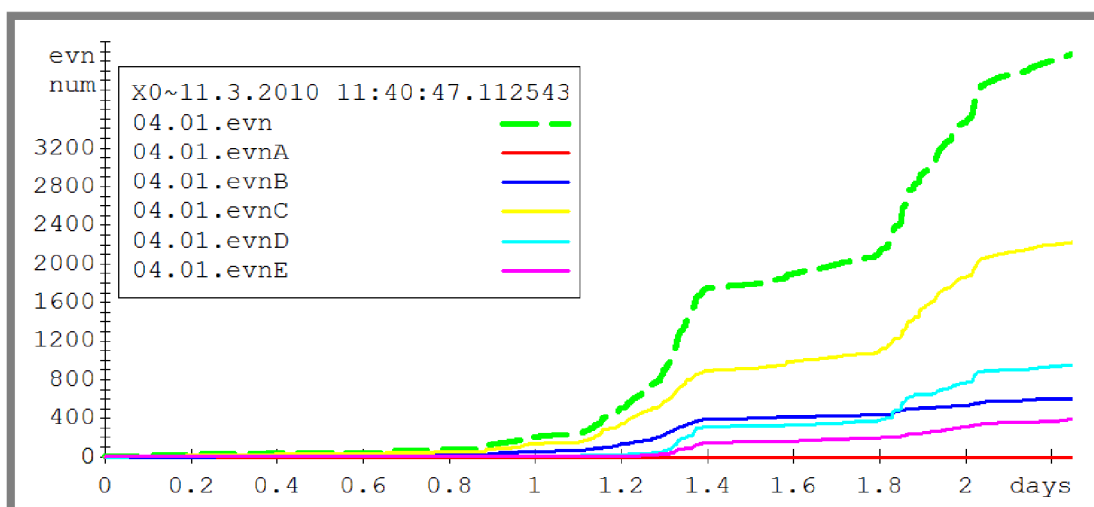
Emisní události roztříděné dle doby trvání (obr. 5.1):

Většina emisních událostí měla délku do 1300 μs . Proto byly typy událostí zařazeny do skupin od 0 do 1300 μs .

Tab. 5.1 Definice typů emisních událostí podle délky trvání

	A	B	C	D	E
od [μs]	0	1000	1100	1200	1300
do [μs]	1000	1100	1200	1300	MAX

V tabulce 5.1 je uvedeno rozdělení do kategorií podle délky emisní události, obdobné dialogové okno lze najít v programu DaeShow a je pouze na uživateli jak si rozsahy nastaví.



Obr. 5.1 Rozdělení emisních událostí podle jejich délek trvání

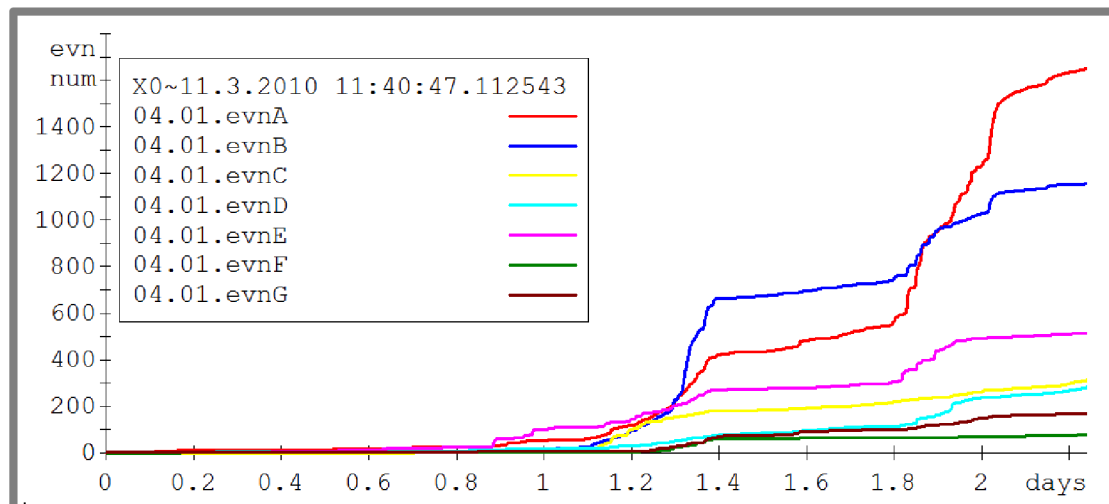
Výsledné závislosti jsou zachyceny na obrázku 5.1. Jedná se o sumační reprezentaci. To znamená, že v konkrétních časech se hodnota počtu emisních událostí rovná součtu všech událostí do daného okamžiku. Z grafu dále vyplývá, že emisní události typu A do délky 1 ms se během zkoušky vůbec nevyskytují. Naopak dominantní složkou jsou emisní události typu C s délkou v rozmezí od 1100 μs do 1200 μs . U všech typů je dobře pozorovatelný zlom v oblasti vzniku prvního únavového poškození ložiska. U typů emisních událostí C a D je dobře patrný i druhý zlom, kdy se ložisko dostává do nebezpečné fáze provozu s únavovým poškozením. To znamená, že emisní události tohoto typu v tomto časovém úseku vznikají a jejich počet se zvyšuje. U typů B a E se hodnota po prvním zlomu ustálí přibližně na stejné úrovni. Z toho vyplývá, že dané typy se po jejich vzniku vyskytují až do konce zkoušky. Zelená přerušovaná čára znázorňuje celkový počet emisních událostí. Součet hodnot koncových bodů všech křivek udává hodnotu koncového bodu sumační celkové křivky.

Emisní události rozříděné dle doby náběhu (obr. 5.2):

Další možnou kategorií je rozřídění emisních událostí podle doby náběhu.

Tab. 5.2 Definice typů emisních událostí podle doby náběhu

	A	B	C	D	E	F	G
od [μs]	0	10	20	40	60	80	100
do [μs]	10	20	40	60	80	100	MAX



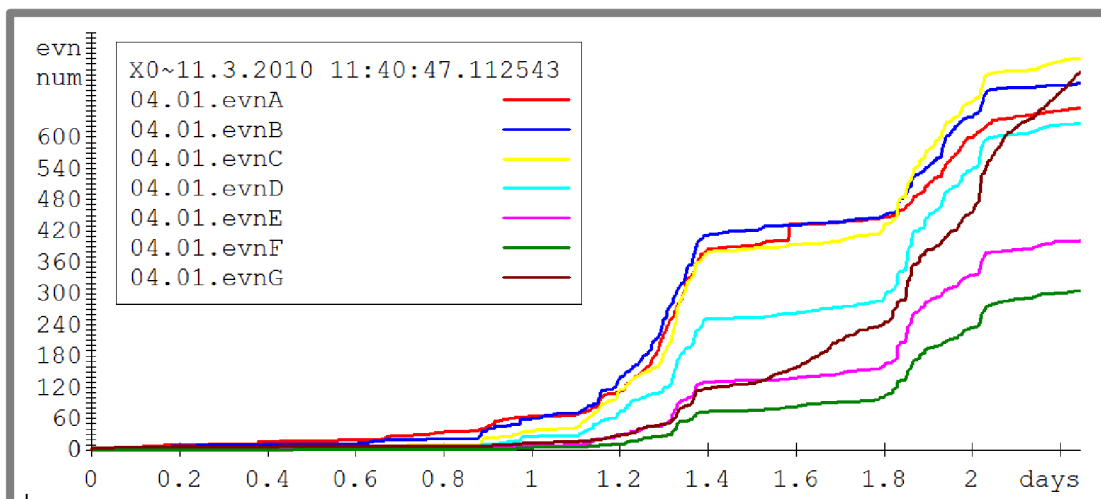
Obr. 5.2 Rozdělení emisních událostí podle jejich dob náběhu

U této kategorie jsem již záměrně vynechal sumační křivku všech emisních událostí, která je stejná jako u předešlé kategorie. Rozsah dob náběhu všech zaznamenaných emisních událostí se nejčastěji pohyboval do hodnoty 100 μs . Proto jsou skupiny rozčleněny do sedmi skupin od 0 do 100 μs . Součet hodnot koncových bodů všech křivek se opět rovná hodnotě koncového bodu křivky, která vyjadřuje součet všech emisních událostí. I v tomto grafu lze pozorovat některá zajímavá místa. Například v místě vzniku prvního únavového poškození lze pozorovat, že křivky charakterizující typy událostí A, B, C a E se navzájem přibližně kopírují.

Emisní události rozříděné dle maximální amplitudy (obr. 5.3):
Počet skupin v této kategorii byl zvolen na sedm.

Tab. 5.3 Definice typů emisních událostí podle maximální amplitudy

	A	B	C	D	E	F	G
od [mV]	0	100	200	300	400	500	600
do [mV]	100	200	300	400	500	600	MAX



Obr. 5.3 Rozdělení emisních událostí podle jejich maximálních amplitud

U této kategorie stejně jako u předchozích platí součet hodnot koncových bodů. Všechny typy událostí se vyznačují razantní změnou ve druhé a třetí fázi provozu ložiska. Nejvíce se po celou dobu zkoušky vyskytují události s maximální amplitudou do 300 mV. Odlišnou charakteristiku mají události s maximálními amplitudami, které se vyznačují pravidelným nárůstem od okamžiku vzniku prvního únavového poškození až po pásmo limitních vibrací.

Na závěr této kapitoly bych ještě uvedl parametry, které v charakteristických místech dosahují největších četností. Jako charakteristická místa jsou v tomto případě zvolena druhá a třetí fáze provozu ložiska, viz kapitola 4.2.2. Co se týče druhé fáze, zde jsou dominantní emisní události o těchto parametrech:

- délka trvání od 1100 μ s do 1200 μ s,
- doba náběhu od 10 μ s do 20 μ s,
- maximální amplituda od 100 mV do 200 mV.

Třetí fáze:

- délka trvání od 1100 μ s do 1200 μ s,
- doba náběhu od 0 μ s do 10 μ s,
- maximální amplituda od 200 mV do 300 mV.

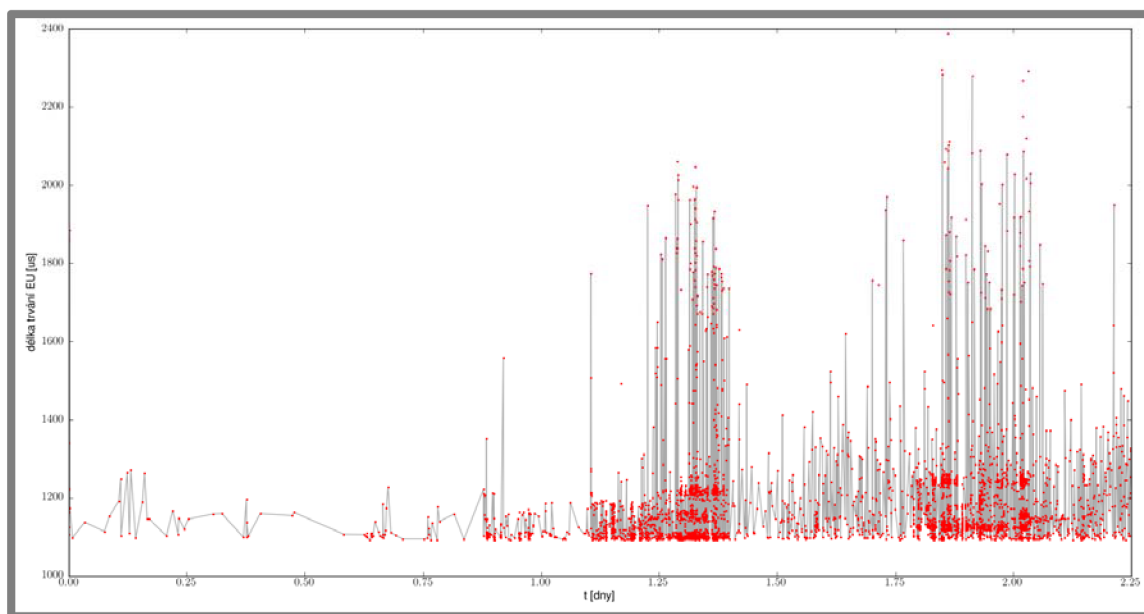
5.2 Závislosti hlavních parametrů emisních událostí na čase zkoušky

Následující charakteristiky (obr. 5.4, 5.5, 5.6) jsou výsledkem snahy dosáhnout hodnotného výstupu, který by korespondoval s předešlými analýzami a zároveň shrnoval všechny dostupné metody zpracování signálu.

Závislosti byly vytvořeny pomocí programovacího jazyka Python. Hlavním důvodem bylo to, že se jedná o volně stažitelnou aplikaci. Konkrétním softwarovým prostředkem pak byl open-source software Scipy. Celému tomuto programovému balíku se říká PyLab. Ten je alternativou komerčního softwaru Matlab.

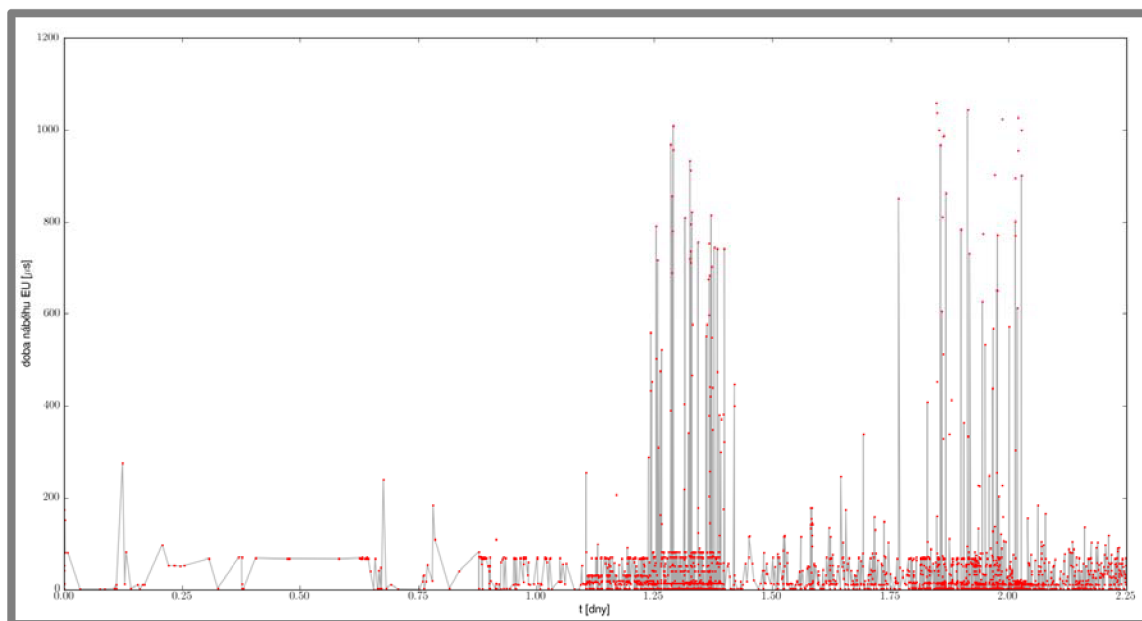
Ve všech grafech na obrázcích (obr. 5.4, 5.5, 5.6) je dvojí reprezentace. Jednak jsou to jednotlivé body, které odpovídají konkrétním hodnotám hlavních parametrů. Druhou reprezentací je lineární interpolace, kdy jsou sousední body propojeny přímkami. Každá s reprezentací má svoje výhody a nevýhody. Bodové vyjádření je výhodnější vzhledem k tomu, že jde konstatovat, jaké emisní události jsou v daných časech a úsecích nejvíce zastoupeny.

V prvním případě se jedná o závislost délky emisních událostí v závislosti na čase zkoušky (obr. 5.4). To, že v prvním úseku grafu jsou body daleko od sebe je způsobeno právě tím, že zde bylo zaznamenáno málo emisních událostí. Ale vzhledem k tomu, že tato oblast není pro ložisko nebezpečná, to není důležité. Při pohledu na závislost je vidět, že průměrná délka emisních událostí se s přibývajícím časem prodlužuje. Je zde dobře pozorovatelná i spodní hranice, pod kterou délky emisních událostí neklesly. To by mohlo být způsobeno horní hranicí šumu.



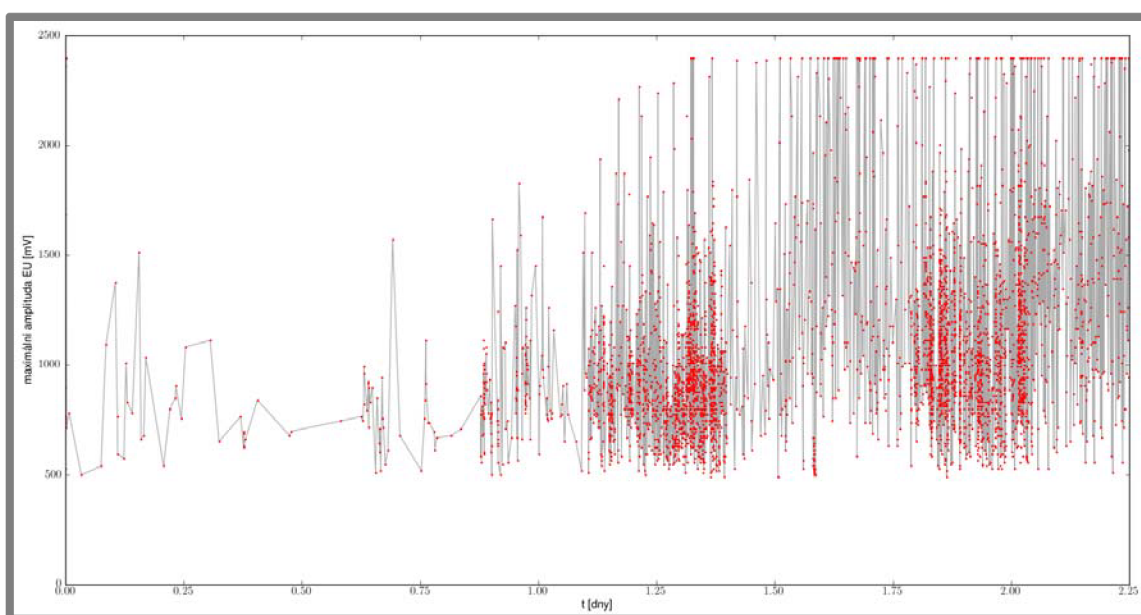
Obr. 5.4 Závislost délek emisních událostí na čase zkoušky

Další obrázek (obr. 5.5) ukazuje graf dob náběhu emisních událostí opět v závislosti na čase zkoušky. Největší počty bodů lze pozorovat v rozmezí přibližně od 0 μ s do 50 μ s. Během druhé a třetí fáze provozu ložiska lze pozorovat se začínají objevovat i události s daleko delší dobou náběhu až 1000 μ s. Mezi druhou a třetí fází se vyskytují události s maximální dobou náběhu okolo 250 μ s.



Obr. 5.5 Závislost dob náběhu emisních událostí na čase zkoušky

Poslední obrázek (obr. 5.6) představuje závislost maximálních amplitud emisních událostí na čase zkoušky. Na začátku druhé fáze ložiska (x-ová souřadnice = 0,9) se projevuje první nárůst amplitud. Z lineární interpolace lze konstatovat, že amplitudy na konci druhé mají v průměru nejvyšší hodnoty a poté nastává pokles. Další výrazný nárůst lze pozorovat až v pásmu limitních vibrací na úplném konci zkoušky.



Obr. 5.6 Závislost maximálních amplitud emisních událostí na čase zkoušky

Problém v tomto případě znamená překročení hodnoty napětí 2400 mV. Tyto emisní události jsou brány právě z hodnotou 2400 mV, tím dochází k určitému zkreslení závislosti.

Závěrem je nutno poznamenat, že naprogramovaný skript je nastaven tak, aby bylo možno při změně vyexportovaného vstupního textového souboru provést okamžitě znovu běh programu bez nutnosti provést nějaké změny v syntaxi.

6 DISKUZE

V této kapitole bude provedeno zhodnocení míry splnění stanovených cílů práce. Dále budou uvedeny vzniklé problémy.

V první části práce se moje pozornost zaměřila zejména na rešeršní studii. To bylo důležité hlavně z toho důvodu, že se jednalo o pro mě zcela novou problematiku. Další část práce znamenala formulaci cílů práce, ke kterým jsem směřoval své úsilí. Následovala praktická část diplomové práce, kterou byly zkoušky trvanlivosti ložisek a vzorků diskových tvarů. Z nich byla získána digitální data pro následnou analýzu, která byla hlavní částí práce.

Vlastním hlavním cílem práce byla hlubší analýza signálu akustické emise při cyklickém zatěžování součástí, a to zejména ložisek. Konkrétní stanovený cíl byl identifikovat stádia únavového poškození, případně jednotlivé typy únavového poškození na úrovni jednotlivých emisních událostí. První z cílů byl splněn a byl vytvořen postup, který jde snadno aplikovat na jakoukoli zkoušku ložiska nebo vzorku diskového tvaru. Tohoto problému se týká nejpodstatnější část této diplomové práce, která obsahuje závislosti hlavních parametrů na čase zkoušky v kapitole páté. Tady lze usoudit, že metoda akustické emise se při zkouškách ložisek a ložiskových materiálů ukazuje jako daleko přesnější oproti dosud využívané vibrační diagnostice, tím že umožňuje daleko včasější varování při změně stavu daného ložiska případně konstrukce.

Hlavním problémem v cestě za identifikací konkrétních únavových projevů se ukázala nedostatečnost počtu vzorků. Tento problém lze odstranit přidáním zařízení, které bude schopno zaznamenávat signál v celém čase zkoušky. Poté by bylo možné provedení vlastní analýzy. Snahou by bylo přiřadit vzniklé únavové projevy konkrétním typům poškození (pitting, spaling, vyhlazování poškození, ...). Další problém, který se týkal překročení maximálního rozsahu pro napětí by mohl být řešen obdobně jako v případě problému s nedostatečným počtem vzorků, kdy by se rozsah změnil v určitém čase na vyšší pomocí naprogramovaných instrukcí a požadavků. I přes vzniklé problémy se podle mého názoru podařilo vytvořit postup pro popsání únavového poškození na ložiscích pomocí analýzy signálu na úrovni emisních událostí. Tyto problémy by se případně týkaly navazujícího doktorského tématu, pro které má tato diplomová práce plnit úkol úvodního navození určitých problémů. Pokračováním bude pokusit se aplikovat metodu akustické emise do celých konstrukčních celků a ověřit její možné použití v praxi.

Naprogramované skripty v programovacím jazyce Python by se v budoucnosti mohly rozšířit pomocí tzv. „toolkitů“ o GUI prostředí. To znamená o grafické uživatelské prostředí, které by bylo příjemnější pro obsluhu analyzátoru.

Ještě bych chtěl zmínit, že metoda akustické emise by se mohla výhodně využít například při diagnostice ložisek poškozených průchodem elektrického proudu, kdy je poškození v porovnání s únavovým poškozením velmi malé a metoda akustické emise je velmi citlivá. Probíhají i některé další pokusy, které se snaží ověřit použitelnost metody akustické emise v různých oblastech strojínského průmyslu. Příkladem mohou být zkoušky leteckých konstrukcí, které jsou zatěžovány cyklicky a podléhají velmi přísným požadavkům na bezpečnost. Výsledky se porovnávají s dalšími konvenčními metodami nedestruktivního zkoušení (ultrazvuk, vířivé proudy, optické metody, ...).[14]

Poměrně neobvyklou aplikaci metody akustické emise lze pozorovat i ve stavebnictví. Kde probíhají testy na aplikování metody akustické emise při posuzování náchylnosti betonu ke vzniku mikrotrhlin při tuhnutí.[15]

Závěrem bych chtěl ještě také poděkovat panu prof. Ing. Luboši Pazderovi, CSc. za odborné připomínky a cenné rady, které přispěly ke zkvalitnění této diplomové práce. Poděkování patří také panu Ing. Filipu Hortovi, který mi pomohl s praktickou částí práce.

Úplným závěrem bych rád poznamenal, že tato diplomová práce rozšířila oblast mého zájmu v inženýrství mimo čistě konstrukční oblast, které se začínám věnovat i mé praxi.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MOORE, P. O. *Nondestructive Testing Handbook - Acoustic Emission Testing*. ASNT, 2005. 446 stran. ISBN 1-57117-106-1.
- [2] KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 1.vydání. Akademické nakladatelství CERM Brno, 2008. 580 stran. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [3] PAZDERA, L., SMUTNÝ, J., MAZAL, P. *Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí*. Vysoké učení technické v Brně, 2004. 111 stran. ISBN 80-214-2802-3.
- [4] PREDITEST – *Akustická emise obecně* [online]. [cit. 2010-01-23]. URL: <http://www.preditest.cz/download/informace/akusticka_emise_obecne.pdf>.
- [5] PREDITEST – *Akustická emise podrobně* [online]. [cit. 2010-01-23]. URL: <http://www.preditest.cz/download/informace/akusticka_emise_podrobne.pdf>.
- [6] SUCHANEK, D. *Přehled současného stavu a nových trendů při hodnocení poškození valivých ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 39 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [7] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN, Praha 2006. 408 stran. ISBN 80-7300-158-6
- [8] ŠROUB, J. *Metoda vířivých proudů* [online]. [cit. 2010-01-23]. URL: <www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2004/EC_SROUB.doc>.
- [9] BILOŠOVÁ, A. *Valivá ložiska* [online]. [cit. 2010-01-24]. URL: http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/VIBDI_6.pdfvalivá ložiska pdf.
- [10] MAZAL, P., HORT, F., VLAŠIC, F., CVRK, K. *Příspěvek k možnosti hodnocení stupně poškození ložisek metodou akustické emise* [online]. [cit. 2010-01-23]. URL: <<http://www.ndt.net/article/defektoskopie2008/papers/313.pdf>>.
- [11] *Degradace strojních součástí – Opatřebení povrchovou únavou* [online]. [cit.2010-01-24]. URL: <<http://degradace.tf.czu.cz>>.
- [12] HOLROYD, T. *Acoustic Emission as a Basis for the Condition Monitoring of Industrial Machinery* [online]. [cit. 2010-01-24]. URL: <<http://home.btconnect.com/HOLROYD-INSTRUME>>.
- [13] SHULL, P. *Nondestructive Evaluation*. Marcel Dekker, Inc., 2002. 841 stran. ISBN 0-8247-8872-9.

- [14] BLAHÁČEK, M., SKÁLA, J. *Akustická emise cyklicky zatěžovaných leteckých konstrukcí* [online]. [cit. 2010-03-14]. URL: <<http://212.8.206.21/article/ENDTdays2007/defektoskopie/2.pdf>>.
- [15] TOPOLÁŘ, L. *Použití akustické emise při pozorování vývoje mikrotrhlin během tuhnutí a zrání dvou betonových směsí při různých způsobech ošetřování* [online]. [cit. 2010-02-10]. URL: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_1/Topolar_Libor_CL.pdf>.
- [16] *Physical acoustic corporation* [online]. c2010 [cit. 2010-04-20]. URL: <<http://www.pacndt.com/>>.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN **8****8.1 Seznam použitých zkratek** **8.1**

NDT – Nedestruktivní zkoušení (Non-destructiv testing)

AE – Akustická emise

TD – Technická diagnostika

EU – Emisní událost

8.2 Seznam použitých symbolů a veličin **8.2**

D [mm]	- vnější průměr ložiska
C ₁₀ [kN]	- základní dynamická únosnost
C1, C2[mV]	- prahové hodnoty napětí
HDT[s]	- mrtvý čas
L ₁₀ [hod]	- základní trvanlivost
Délka EU[μs]	- délka emisní události
Risetime[μs]	- doba náběhu
RMS[mV]	- střední kvadratická hodnota signálu
U[mV]	- měřicí napětí
T [s]	- perioda
a _m [m·s ⁻²]	- amplituda
d [mm]	- vnitřní průměr ložiska
f [Hz]	- frekvence
n [-]	- počet kuliček nebo válečků
t [s]	- čas

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Princip prozařovacích metod [2]	14
Obr. 1.2 Princip odrazové metody ultrazvuku [2]	16
Obr. 1.3 Schéma normálního nebo emulgačního postupu [2]	16
Obr. 1.4 Princip metody vířivých proudů[2]	17
Obr. 1.5 Indikace vady na konkrétní součásti metodou vířivých proudů[8]	17
Obr. 1.6 Vztah mezi technickou diagnostikou (TD), NDT a AE [2].....	18
Obr. 1.7 Princip AE [7].....	18
Obr. 1.8 Spojitý signál (vlevo) a praskavý signál AE (vpravo) [3]	19
Obr. 1.9 Znatelná i neznatelná mez kluzu je výrazná při sledování signálu akustické emise[3]	21
Obr. 1.10 Kaiserův jev[2]	22
Obr. 1.11 AE v prodlevách zatěžování [2]	22
Obr. 1.12 Fellicity jev [2]	22
Obr. 1.13 Pitting jako zdroj signálu AE[6].....	23
Obr. 1.14 Teoretický signál AE [5]	24
Obr. 1.15 Energie emisní události [3].....	24
Obr. 1.16 Mrtvý čas mezi událostmi AE [3].....	25
Obr. 1.17 Schéma kompletace emisních událostí u vícekanálového měření[3]	26
Obr. 1.18 Princip lineární lokalizace událostí AE[2].....	27
Obr. 1.19 Schéma piezoelektrického snímače [3]	27
Obr. 1.20 Schéma přenosové trasy signálu AE[2].....	28
Obr. 2.1 Aplikace akustické emise na tlakové nádobě s připevněnými snímači AE na povrchu[4]	30
Obr. 2.2 Aplikace akustické emise na transportním potrubí [4].....	31
Obr. 2.3 Zkušebna ložisek v dílnách Ústavu konstruování	31
Obr. 2.4 Stanice Axmat v dílnách Ústavu konstruování.....	32
Obr. 2.5 Reálný záznam signálu AE získaný při zkoušce ložiska	32
Obr. 4.1 Ukázka vzorku diskového tvaru s únavovým poškozením v kontaktní stopě viditelným pouhým okem.....	35
Obr. 4.2 Axiální ložisko ZVL	36
Obr. 4.3 Ukázka únavového poškození (pittingu) vlevo na zkušebním vzorku C1 a vpravo na reálném ložisku ZVL.....	36
Obr. 4.4 Stanice Axmat.....	37
Obr. 4.5 Analyzátor DAKEL - XEDO	37
Obr. 4.6 Záznam počtu překmitů přes nastavenou prahovou hodnotu s různými stupni filtrace na prvním snímači u vzorku C1	39
Obr. 4.7 Záznam počtu překmitů a RMS u vzorku C1	39
Obr. 4.8 Záznam počtu překmitů přes nastavenou prahovou hodnotu s různými stupni filtrace na prvním snímači u axiálního ložiska výrobce ZVL.....	39
Obr. 4.9 Závislost počtu emisních událostí na čase zkoušky získaná u vzorku C1 ...	40
Obr. 4.10 Identifikace fází únavového života ložiska ZVL.....	40
Obr. 4.11 Práce v programu DaeShow – definice typů emisních událostí	42
Obr. 4.12 Práce s navzorkovaným signálem v programu DaeShow	43
Obr. 4.13 Výběr reprezentativních vzorků ve fázích provozu ložiska	44
Obr. 4.14 Sumační graf počtu emisních událostí během doby zkoušky	45
Obr. 4.15 Rozložení vzorků signálu v čase zkoušky	45
Obr. 4.16 Ukázka části vyexportovaného textového souboru vzorku z programu	

DaeShow.....	46
Obr. 4.17 Závislost maximálních amplitud na počtu vzorků získaných během zkoušky	46
Obr. 4.18 Ukázka části vyexportovaného textového souboru, který slouží jako podklad pro závěrečnou analýzu	47
Obr. 4.19 Program na import textového souboru z prostředí DaeShow	48
Obr. 5.1 Rozdělení emisních událostí podle jejich délek trvání	49
Obr. 5.2 Rozdělení emisních událostí podle jejich dob náběhu	50
Obr. 5.3 Rozdělení emisních událostí podle jejich maximálních amplitud.....	51
Obr. 5.4 Závislost délek emisních událostí na čase zkoušky.....	52
Obr. 5.5 Závislost dob náběhu emisních událostí na čase zkoušky	53
Obr. 5.6 Závislost maximálních amplitud emisních událostí na čase zkoušky	53

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Rychlost šíření ultrazvukových vln ve vybraných materiálech [2]	15
Tab. 1.2 Výhody a nevýhody metody nedestruktivního zkoušení vířivými proudy[2]	17
Tab. 1.3 Vlastnosti metody akustické emise [3]	19
Tab. 1.4 Základní typy vln [2]	20
Tab. 1.5 Závislost počtu měřicích kanálů na úrovni vyhodnocení signálu AE[2].....	25
Tab. 5.2 Definice typů emisních událostí podle doby náběhu.....	49
Tab. 5.1 Definice typů emisních událostí podle doby trvání.....	50
Tab. 5.3 Definice typů emisních událostí podle maximální amplitudy.....	51

11 SEZNAM PŘÍLOH

11

Příloha I. – Zpráva o průběhu zkoušky axiálního ložiska ZVL L4 51102

Příloha II. - Závislost maximálních amplitud emisních událostí na čase zkoušky

Příloha III. - Závislost dob náběhu emisních událostí na čase zkoušky

Příloha IV. - Závislost délek emisních událostí na čase zkoušky