



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**NÁVRH A OVĚŘENÍ FUNKCE STANICE PRO KALIBRACI
SNÍMAČŮ AE PŘI TESTOVÁNÍ LOŽISEK**

DESIGN AND VERIFICATION OF STATION FOR CALIBRATION OF AE SENSORS FOR BEARING TESTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matej Bančák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Matej Bančák**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

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:

Návrh a ověření funkce stanice pro kalibraci snímačů AE při testování ložisek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kvalita a parametry snímačů rozhodujícím způsobem ovlivňují výsledky zkoušek realizovaných metodou akustické emise. Opakovaným využitím snímačů jejich vlastnosti v čase postupně degradují a je nutno provádět pravidelnou kalibraci. Tato kalibrace je realizována u externích dodavatelů. Realizace zařízení umožní operativně provádět srovnávací kalibraci a sledovat změny snímačů v závislosti na jejich exploataci.

Typ práce: výzkumná

Projekt: MPO

Cíle diplomové práce:

Cílem je konstrukční návrh a ověření funkčnosti přenosné stanice pro srovnávací kalibraci snímačů akustické emise, které jsou určeny pro diagnostiku poškození valivých ložisek.

Dílčí cíle diplomové práce:

- návrh konstrukčního řešení kalibrační stanice,
- realizace a ověření funkčnosti stanice,
- provedení základních experimentů a návrh metodiky kalibrace.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, výkres sestavení, laboratorní protokol.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

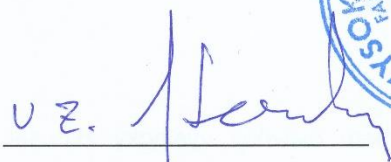
SHIGLEY, Joseph E., MISCHKE, Charles R., BUDYNAS, Richard G.: Konstruování strojních součástí. Translation Hartl, M. a kol., překlad 7. vydání, VUTIUM, Brno, 2010, 1160 s., ISBN 978-80-214-2629-0.

KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav: Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu. BEN-Technická literatura, Praha, 2006, 410 s., ISBN 80-7300-158-6.

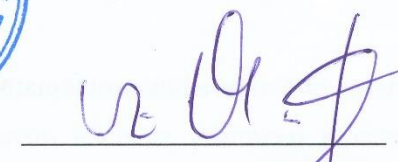
SHULL, Peter J.: Nondestructive Evaluation - Theory, Techniques, and Applications. Marcel Dekker, New York, 2002, 844 s., ISBN 0-8247-8872-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016


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




doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá kalibráciou snímačov AE, používaných pri diagnostike ložísk. V konštrukčnej časti boli navrhnuté dve rôzne koncepčné riešenia obdobné zariadeniam používaných pri diagnostike ložísk. Následne bolo zostavené experimentálne zariadenie určené pre relatívnu kalibráciu s využitím rotácie ložísk ako zdroja spojitej AE. Experimentálna časť je orientovaná na pozorovanie priebehu parametru RMS, ktorý v práci slúži ako vyhodnocovací parameter citlivosti snímačov. Ako zdroje AE boli použité ložiská s určitým typom poškodenia, čo umožnilo tvorbu charakteristík citlivosti podľa daného druhu poškodenia. Boli vytvorené charakteristiky citlivosti vybraných snímačov AE, ktoré slúžia na stanovenie efektivity pri relatívnej kalibrácii. Bola pozorovaná exponenciálna závislosť citlivosti snímačov MDK-13 na softwarovom zosilnení analyzátoru AE. Vytvoril sa návrh metódy kalibrácie pre snímače typu MDK-13 na princípe porovnávania so stanoveným referenčným snímačom.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Akustická emisia, kalibrácia, snímače AE, valivé ložiska, poškodenie ložísk

ABSTRACT

The diploma thesis deals with calibration of AE sensors used in diagnostics of bearings. Two different conceptual solutions similar to those used in the diagnostics of bearings were designed in the design. Subsequently, the experimental device was designed for relative calibration using the rotation of bearings as a continuous AE source. The experimental part is oriented to the observation of the RMS parameter, which serves as a sensor sensitivity evaluation parameter.

As sources of AE, bearings with a certain type of damage were used, which allowed for the formation of sensitivity characteristics according to the type of damage. Sensitivity characteristics of selected AE sensors have been developed to determine the effectiveness in relative calibration. The exponential sensitivity sensitivity of the MDK-13 sensors was observed on the software amplification of the AE analyzer. A proposal for the calibration method for MDK-13 type sensors was developed on the principle of comparison with the reference sensor.

KEYWORDS

Acoustic emission, calibration, AE sensors, rolling bearings, damage of bearings

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BANČÁK, M. *Návrh a ověření funkce stanice pro kalibraci snímačů AE při testování ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc..

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc., za jeho veľmi cenné rady a veľkú ochotu pri konzultáciách. Ďalej by som chcel poďakovať Ing. Františkovi Vlašicovi, Ph.D. za cenné informácie ohľadne manipulácie s meracím zariadením a vedúcemu dielni Rostislavovi Konečnému za ochotu pri výrobe komponentov experimentálneho zariadenia. V neposlednej rade patrí poďakovanie mojej rodine, ktorá ma vždy podporovala.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce doc. Ing. Pavla Mazala, CSc. a v zozname som uviedol všetky literárne a odborné zdroje.

V Brne dňa

.....
Podpis

OBSAH

1 Úvod	13
2 Zhrnutie súčasného stavu poznania odbornej problematiky	14
2.1 (NDT) Non-destructive testing	14
2.2 Akustická emisia	14
2.3 Senzory akustickej emisie	14
2.3.1 Piezoelektrické snímače AE	15
2.3.2 Piezofilmové snímače	16
2.3.3 Optické snímače	16
2.3.4 Elektromagneticko-akustické snímače	16
2.3.5 Kapacitné snímače	17
2.4 Kalibrácia snímačov AE	17
2.4.1 Absolútna kalibrácia	18
2.4.2 Relatívna kalibrácia	18
2.5 Aplikácia metódy akustickej emisie na pozorovanie defektov ložísk a konštrukcia meracích staníc	19
2.5.1 Konštrukcia stanice pre skúšky pomalybežných ložísk	19
2.5.2 Konštrukcia vertikálnej stanice pre skúšky ložísk	21
2.5.3 Konštrukcia stanice pre skúšky ložísk na VUT	22
3 Analýza problému a ciele práce	24
4 Materiál a metódy	26
4.1 Návrh konštrukcie experimentálneho zariadenia	26
4.2 Konceptné riešenie č. 1	26
4.3 Konceptné riešenie č. 2	28
4.3.1 Modely kalibračnej časti	28
4.3.2 Favorizované riešenie	29
4.4 Hsu-Nielsenov zdroj (Pen-test)	30
4.5 Metodika hodnotenia snímačov AE	31
4.5.1 Systém DAKEL XEDO	32
4.5.2 Program Xedo Daemon a Daeshow	33
4.5.3 Postup merania	33
4.5.4 Vyhodnocovací postup	34
4.5.5 Použité softwarové zosilnenie	35
4.5.6 Použité ložiska	35
4.5.7 Použité snímače	36
5 Výsledky	37
5.1 Konštrukčná časť	37
5.2 Favorizovaný návrh	37
5.3 Kalibračné teleso	38
5.4 Vlastnosti použitého elektromotora	39
5.4.1 Regulácia otáčok	40
5.5 Zostavenie experimentálneho zariadenia	41
5.6 Experimentálna časť	43
5.7 Metodika hodnotenia snímačov AE	43
5.7.1 Voľba referenčného snímača Pentestom	43

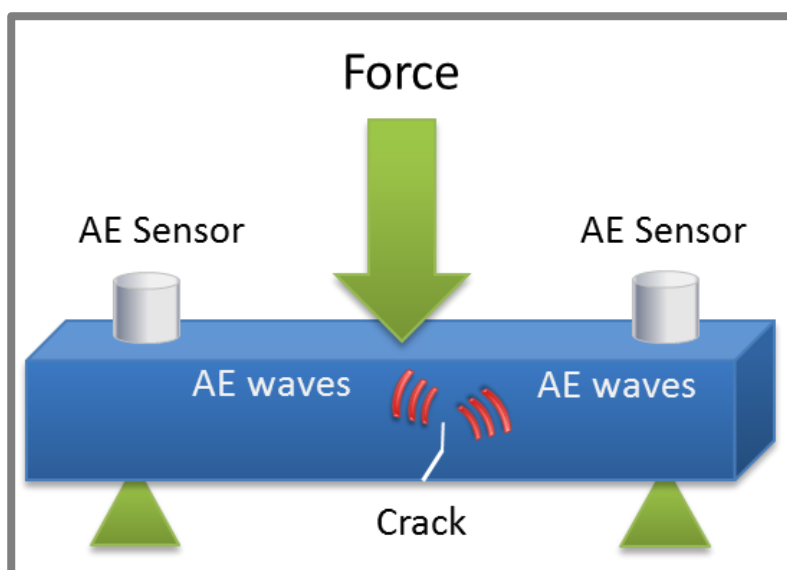
5.8	Vyhodnotenie výsledkov testovania kalibračnej metódy s väzbovým médiom	45
5.8.1	Spôsob spracovania signálu	45
5.8.2	Nulová hladina komunikačných kanálov (Vplyv hladiny šumu)	46
5.8.3	Experimenty so softwarovým zosilnením 0 dB	46
5.8.4	Experimenty pri softwarovom zosilnení 10 dB	48
5.8.5	Experimenty pri softwarovom zosilnení 20 dB	49
5.8.6	Experimenty dlhších kalibračných časov	49
5.8.7	Vplyv zmyslu rotácie	50
5.9	Výsledky z kalibračných testov bez väzbového média	51
5.10	Charakteristiky snímačov AE MDK-13	52
5.10.1	Charakteristika citlivosti snímača MDK-13-1	52
5.10.2	Charakteristika citlivosti snímača MDK-13-2	53
5.10.3	Charakteristika citlivosti snímača MDK-13-3	54
5.10.4	Charakteristika citlivosti snímača MDK-13-4	54
5.11	Návrh metódy kalibrácie	55
6	Diskusia.....	57
6.1	Konštrukčná časť	57
6.2	Experimentálna časť	57
7	Záver	60
8	Zoznam použitých zdrojov	61
9	Zoznam použitých skratiek, symbolov a veličín.....	64
10	Zoznam obrázkov a grafov.....	65
11	Zoznam tabuliek.....	67
12	Zoznam príloh	68

1 ÚVOD

Akustická emisia (ďalej len AE) je fyzikálny jav, pri ktorom sa vplyvom dynamických procesov v materiáli uvoľňuje elastická energia a šíri sa prostredníctvom prechodových vln (Obr. 1-1). Na povrchu telesa sa elastické vlny transformujú na rôzne typy vlnenia, ktoré odpovedajú danej veľkosti a tvaru. Kolmé zložky vln k povrchu vytvárajú napäťové vlny, ktoré sa pozorujú (najčastejšie) za pomoci piezoelektrických snímačov. Tieto snímače prevádzajú napäťové vlny na elektrický signál, ktorý sa následne spracúva v meracích zariadeniach [3]. Avšak pre spoľahlivú a presnú funkciu snímačov je nutná ich pravidelná kalibrácia.

Výskum udáva, že akustická emisia dokáže byť veľmi spoľahlivá pri detekcii defektov ložísk. Jej citlivosť na prítomnosť akejkoľvek nerovnosti či defektu je niekoľkonásobne vyššia ako u štandardizovaných metód, ktorou je napr. *metóda vibrácií, analýza satorových prúdov apod* [1].

Táto diplomová práca je zameraná na návrh, realizáciu a nasledovné overenie funkcie stanice pre kalibráciu snímačov akustickej emisie. Ďalším bodom bude zostavenie metodiky hodnotenia kalibrovaných piezoelektrických snímačov (ktorými disponuje ÚK) a ich následná klasifikácia do kvalitatívnych kategórií. Kalibrácia bude realizovaná na skonštruovanej stanici. Ústav konštruování je zameraný mimo iné aj na výskum kontaktnej únavy materiálov a trvanlivosti ložísk s využitím moderných diagnostických postupov. Preto sú znalosti parametrov snímačov AE pri tomto druhu zaťažovania nutnosťou.



Obr. 1-1 Princíp Akustickej emisie [12]

2 ZHRNUTIE SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA ODBORNEJ PROBLEMATIKY

2.1 (NDT) Non-destructive testing

NDT je skratkou pre nedeštruktívne testovanie konštrukcií a materiálov. Toto odvetvie technickej diagnostiky je zamerané na oblasť testov, ktoré nenarúšajú funkciu zariadenia a žiadnym spôsobom nedeformujú testované teleso. NDT metódy pracujú na princípoch, ktoré charakterizujú súčasný stav z hľadiska prítomnosti trhlín, technologických prasklín a iných defektov prítomných v materiáli. Primárnym cieľom týchto metód je identifikácia, lokalizácia a orientácia šírenia defektu, ktorý sa v danom telese vyskytuje. Na základe takto získaných poznatkov sme schopní posudzovať stav testovaného telesa alebo zariadenia. Či testovaný materiál obsahuje defekt je možné zistiť na základe rôzneho typu fyzikálnych zmien, ktoré by v bezdefektovom materiáli nenastali. Táto zmena sa prejavuje napr. zmenou toku vírivých prúdov, zmenou intenzity žiarenia alebo v smere šírenia UZ vln.

Toto odvetvie sa začalo rozvíjať v 20. storočí a postupne sa z neho stal nenahraditeľný odbor technickej diagnostiky.

2.2 Akustická emisia

Je to diagnostická metóda, ktorá pozoruje vznik a rast rôznych typov porúch v materiáli a na povrchu. Vznik a šírenie trhlín v krehkých materiáloch zapríčiňuje lokálne uvoľnenie deformačnej energie v mieste výskytu trhliny. Vo výsledku dochádza k šíreniu elastických vln v testovanom telese.

Najdôležitejším prínosom AE v priemysle je, že metóda je schopná zavčas varovať v prípade okamžitej poruchy. Metóda AE je totiž schopná reagovať na zmenu štruktúry (defekt) už pri jej vzniku a iniciácii.

2.3 Senzory akustickej emisie

Snímač AE je zariadenie, ktoré pri podnietení elastickou vlnou (výchyľkou povrchu) generuje elektrický signál. Snímače AE môžu pracovať na viacero fyzikálnych princípoch. Elektrické signály môžu byť generované pomocou elektromagnetických senzorov, ako sú fonografické snímače, kapacitné snímače, magnetostrikčné snímače, piezoelektrické snímače alebo pomocou laserových interferometrov (detekcia povrchového posunutia). Presný vzťah medzi vlastnosťami vlny a výstupným signálom bude závisieť na type senzora a druhu vlny [5].

Za ideálny senzor považujeme taký, ktorý by produkoval identickú charakteristiku napätia-času s charakteristikou amplitúdy-času vlny v bodovom mieste, kde je snímač umiestnený [6]. Žiaden typ snímaču však nemožno považovať za ideálny v plnom rozsahu charakteristík. Avšak existuje množstvo dostupných snímačov, ktoré pracujú s dobrou spoľahlivosťou pri konkrétnych typoch vln a v určitých rozsahoch parametrov. Vzhľadom na široké spektrum frekvencií rôznych akustických kvalít obsiahnutých vo väčšine signálov akustickej emisie, takmer každý výše spomenutý typ snímaču dokáže detekovať AE. Za optimálny senzor považujeme taký, ktorý zlepšuje a kvalitne spracúva prijaté dáta. Preto použitie nedôveryhodného resp. nekalibrovaného senzoru môže viesť až k nepresnosti celého merania alebo experimentu, najmä pri nízkej amplitúde pozorovaných emisií [6].

Pri nedeštruktívnom testovaní (NDT) je väčšina AE senzorov piezoelektrických (Obr. 2-1). Piezoelektrické snímače AE umožňujú maximálnu citlivosť a preto sú najčastejšie používaným druhom snímačov v aplikáciách AE. Interferometrické a kapacitné snímače sa používajú zväčša ako referenčné snímače pri kalibrácii piezoelektrických [7].

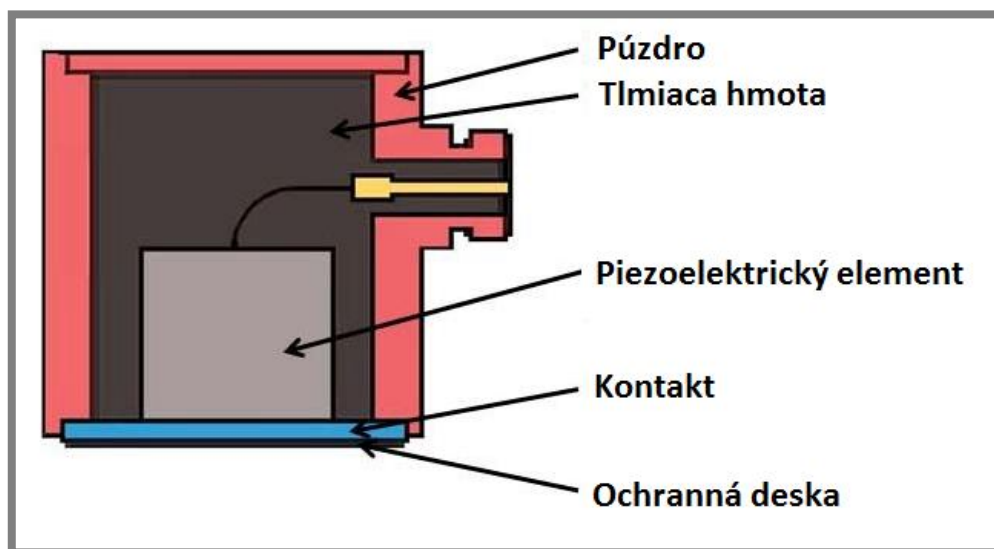


Obr. 2-1 Typy piezoelektrických AE snímačov [11]

2.3.1 Piezoelektrické snímače AE

2.3.1

Jedná sa o najpoužívanejšie snímače (Obr. 2-2), ktoré sú závislé na materiáli piezoelektrického elementu. Element sa zvyčajne vyrába zo špeciálneho materiálu ako je bariump-titanová, zirkonátová a niobátová keramika. Sú to materiály s Curierovou teplotou (strata piezoelektrických vlastností) v rozmedzí 100- 300°C [8]. Pri teplotách vyšších je potrebné použiť iné materiály ako sú lithium niobáty (1210°C) alebo rezané časti kryštálu kremíku.



Obr. 2-2 Detail piezoelektrického AE snímača [8]

Aktívnym prvkom tohto druhu snímača je piezoelektrický kryštál s elektródou. Kryštál je ochránený ochrannou vrstvou. Na tento piezoelektrický element je pripevnený tlmič [9]. Jeho funkciou je rozširovať šírku pásma snímaču, ale z dôvodu zaťaženia kryštálu sa znižuje citlivosť snímaču. Tlmiče sú najčastejšie vyrábané z epoxidovej živice s veľkým obsahom wolfrámových častíc alebo mosadze. Požiadavky sú kladené najmä

na veľký útlm a na značnú disperziu pre ultrazvukové vlny. Návrh konštrukcie tlmičov je pri tomto type snímaču najväčším problémom.

Rezonančné a širokopásmové piezoelektrické snímače AE

Pri metóde AE sa často stretávame, vďaka požiadavke na vysokú citlivosť, s rezonančnými nezatlmenými snímačmi AE. Snímače AE využívajú väčšinou rezonančnej frekvencie, ktorá sa viaže na priečne radiálne kmity valcovej doštičky piezoelementu. Táto frekvencia určuje frekvenciu a frekvenčné pásmo merania a tým aj radu dôležitých charakteristík merania [4].

Vyššia citlivosť rezonančných snímačov AE znamená, že sa zvýrazňuje citlivosť na jednej rezonančnej frekvencii. Pri potlačení rezonančnej citlivosti snímaču AE získavame širokopásmový snímač AE, ktorý detekuje budiaci signál AE v širokom frekvenčnom spektre s relatívne podobnou citlivosťou. Reprodukujú vernejšie časový priebeh budiaceho pulzu AE a snímač nerozkmitáva (za cenu istého poklesu citlivosti) [4].

2.3.2 Piezofilmové snímače

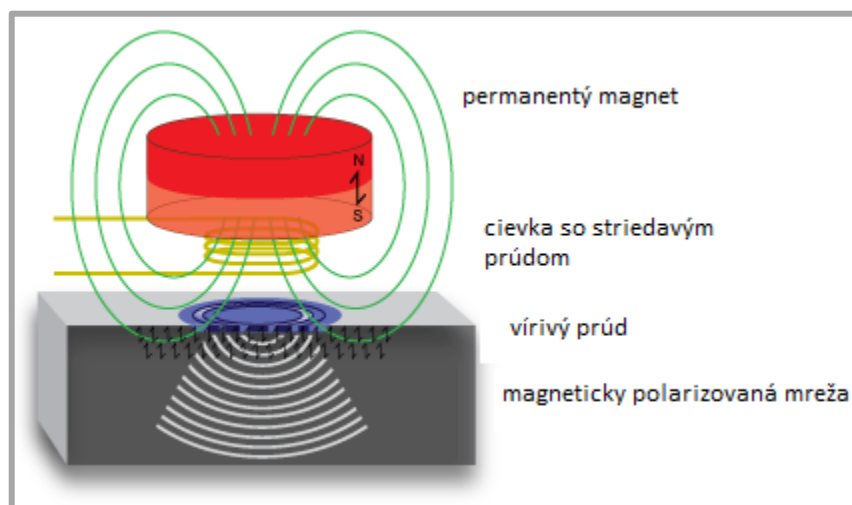
Špeciálny typ piezoelektrických snímačov, využívajúci na funkciu materiálu polykryštalických polymérov s piezoelektrickými vlastnosťami [14], ktoré sa vyznačujú najmä 10x vyššou citlivosťou ako snímače piezoelektrické. Dôvodom nižšieho použitia v prevádzke je výrazná závislosť na teplote.

2.3.3 Optické snímače

Laserové interferometre generujú vysokofrekvenčný signál za pomoci Braggovej mriežky. Princíp funkcie je založený na odraze lúču hélia-neónového laseru od povrchu sledovaného telesa späť do snímača [17]. S využitím Dopplerovho javu je možné z výchylky povrchu telesa generovať frekvenčnú alebo fázovú moduláciu laseru. Snímače sa vyznačujú jednoduchou kalibráciou. Nevýhoda týchto snímačov je v nízkej citlivosti.

2.3.4 Elektromagneticko-akustické snímače

Electromagnetic acoustic transducers (EMAT) je anglický názov pre bezkontaktné snímače AE (Obr. 2-3) fungujúcich na princípe mechanických kmitov častíc materiálu



Obr. 2-3 Princíp elektromagneticko-akustického snímača [18]

pri pôsobení stáleho magnetického pola [16]. Častice vytvárajú v materiáli meraného telesa striedavý prúd indukujúci prúd v cievke sondy. Sú taktiež schopné vyvolať v skúšanom telese budenie založené na princípe elektromagnetického pulzu. Sú schopné v magnetickom materiáli vyvolať pulz Lorentzovou silou a magnetostríčnym javom.

2.3.5 Kapacitné snímače

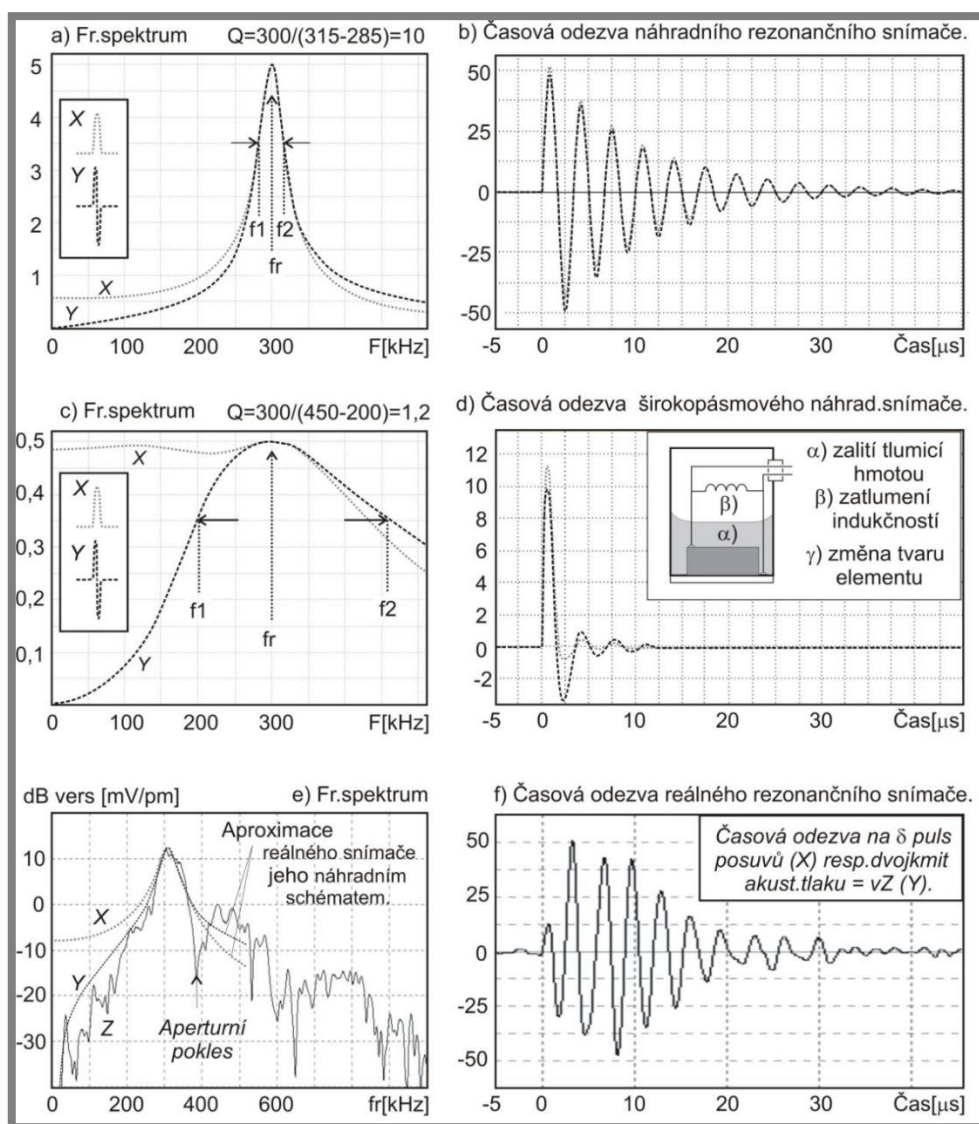
2.3.5

Elastické deformácie (výchylka povrchu) je možné merať aj za pomoci kapacitnej metódy, pri ktorej elektrický signál kopíruje elastické vychýlenie povrchu. Tento jav je vyjadrený rovnou frekvenčnou charakteristikou. Citlivosť týchto snímačov sa v porovnaní s piezoelektrickými dá považovať za nízku [15], avšak šírka snímaného pásma je v rozsahu 10 kHz až 10 MHz.

2.4 Kalibrácia snímačov AE

2.4

Snímač AE prevádza mechanické elastické vlny z povrchu telesa na elektrický signál (2-4). Vlastnosti snímača sa definujú pomerom odozvy výstupného elektrického



Obr. 2-4 Ukážka frekvenčných a časových charakteristík snímačov AE [4]

signálu k vstupnému mechanickému budeniu. Kalibráciou rozumieme určenie hodnôt výstupného elektrického signálu k známemu vstupnému mechanickému budeniu [4]. Existuje viacero druhov kalibrácií, ktoré možno aplikovať na piezoelektrické AE snímače [7]. Časovo a finančne najvýhodnejšou je relatívna kalibrácia.

2.4.1 Absolútna kalibrácia

Absolútna kalibrácia (Obr. 2-5) znamená, že citlivosť je pomer meranej odozvy elektrického signálu vo Voltoch na budenie uvádzané v metroch (piezoelektrické snímače) či Pascaloch (kapacitné mikrofóny). Avšak budenie AE nie je udávané jednou veličinou (akustickým tlakom pod snímačom) a ani odozva nie je udávaná jedným číslom vo Voltoch (časový priebeh výstupného elektrického napätia). Pritom časové odozvy vstupných a výstupných parametrov nie sú zhodné. To znamená, že citlivosť nie je možné definovať ako jedno číslo rozmeru VPa^{-1} resp. Vm^{-1} . Hlavná úloha absolútnej kalibrácie spočíva vo voľbe správneho budenia udalosti AE. Tá sa najčastejšie realizuje generátorom pulzov či zlomením kapiláry. Cieľom je na vstupe snímača (v mieste styku povrchu telesa a snímača) vytvoriť aproximáciu ostrého δ pulzu. Odozva (Obr. 2-4 e,f) na δ pulz predstavuje tzv. *prenosovú funkciu*, ktorá reprezentuje základný exaktný popis odozvy systému na prechodové javy. Táto

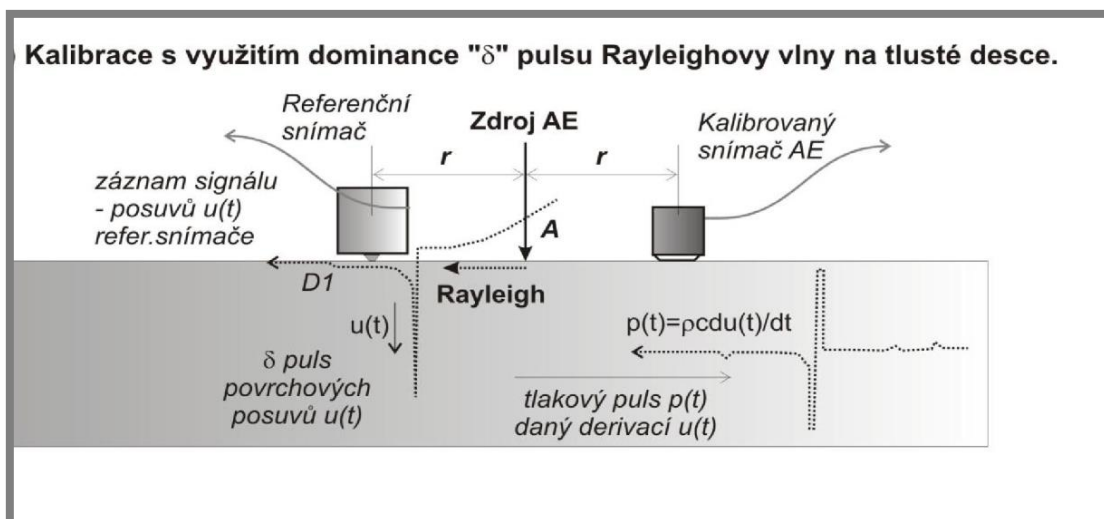


Obr. 2-5 Absolútna kalibrácia AE snímačov realizovaná na FEKT [4]

kalibrácia je však zatiaľ len vedeckým experimentom a väčšina výrobcov senzorov AE používa pre kalibrovanie relatívnu kalibráciu [4].

2.4.2 Relatívna kalibrácia

Porovnáva sa odozva rôznych snímačov alebo toho istého snímača v rôznych časoch. Buď porovnávame iba rozdiely v citlivosti charakteristické maximálnou amplitúdou odozvy signálu (napr. Hsu-Nielsenov zdroj - Pentest, lom kapiláry apod.) alebo používame komplexnejšiu variantu, kedy porovnávame rozdiely frekvenčnej odozvy



Obr. 2-6 Relativná kalibrácia AE snímačov [4]

(Obr. 2-4) na ten istý budiaci zdroj AE. Hlavnou porovnávacou hodnotou relatívnej kalibrácie je *maximálna amplitúda*. Pri relatívnej kalibrácii (Obr. 2-6) je potrebné, aby pri každom kalibrovaní bolo budenie totožné. To platí aj pre kalibračné teleso, vzájomné umiestnenie budiaceho zdroja a snímačov AE. Údaje o veľkosti a priebehu mechanického budenia nie sú podstatné [4].

2.5 Aplikácia metódy akustickej emisie na pozorovanie defektov ložísk a konštrukcia meracích staníc

2.5

Pri rotácii ložísk dochádza k spojitaj udalosti AE, čo je iný prípad ako u lomu kapiláry ci Pen-teste, kde dochádza k nespojitému charakteru udalosti AE. Preto by kalibrácia mala byť prispôbena princípu diagnostike ložísk.

Dôležitosť merania a pozorovania ložísk je zásadným aspektom pri celkovej diagnostike strojov a mechanizmov. Ich funkcie zaistujú spoľahlivý chod stroja.

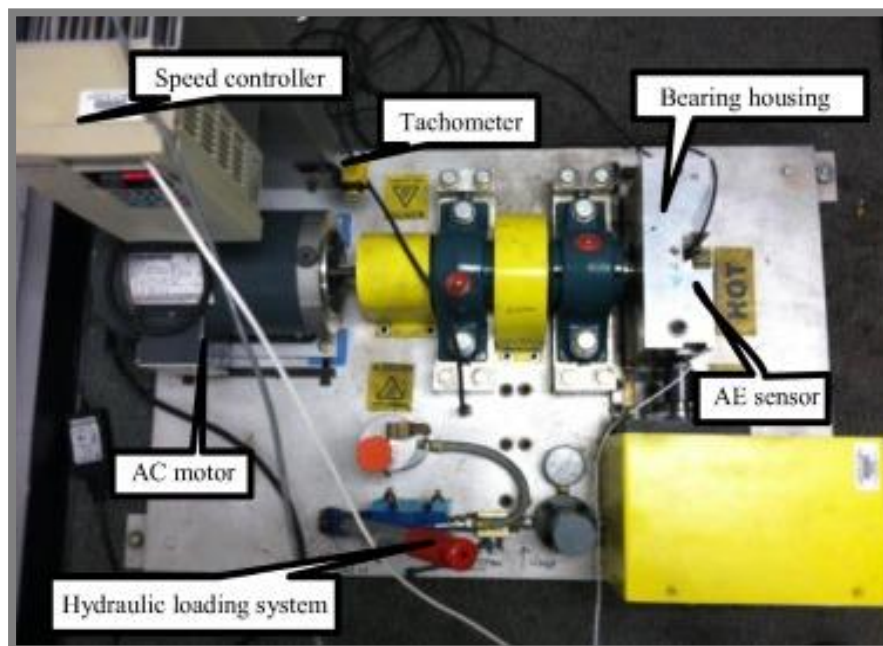
Vo väčšine prípadov pozorovania defektov ložísk sa používa rozsiahla metóda vibrácií. Vibrácie sú merané použitím senzorov vibrácií, ako sú akcelerometre a vibračné meniče rýchlosti. Pri tejto metóde sa pozoruje prevažne zmena rýchlosti skúšaného objektu [9]. Avšak použitie tejto metódy je obmedzené, najmä pri detekcii počiatku trhliny [1]. Preto sa vedci začali zameriavať na využitie metódy akustickej emisie v skúmaní defektov ložísk. Citlivosť na prítomnosť trhliny a vysoký odstup hitu AE od šumu sú dôležité výhody tejto metódy. Avšak jej nevýhodou je potreba kvalifikovanej obsluhy a AE snímačov [2].

V súčasnosti sa však nikto nezameriava na relatívnu kalibráciu s využitím ložísk ako zdroja AE.

2.5.1 Konštrukcia stanice pre skúšky pomalybežných ložísk

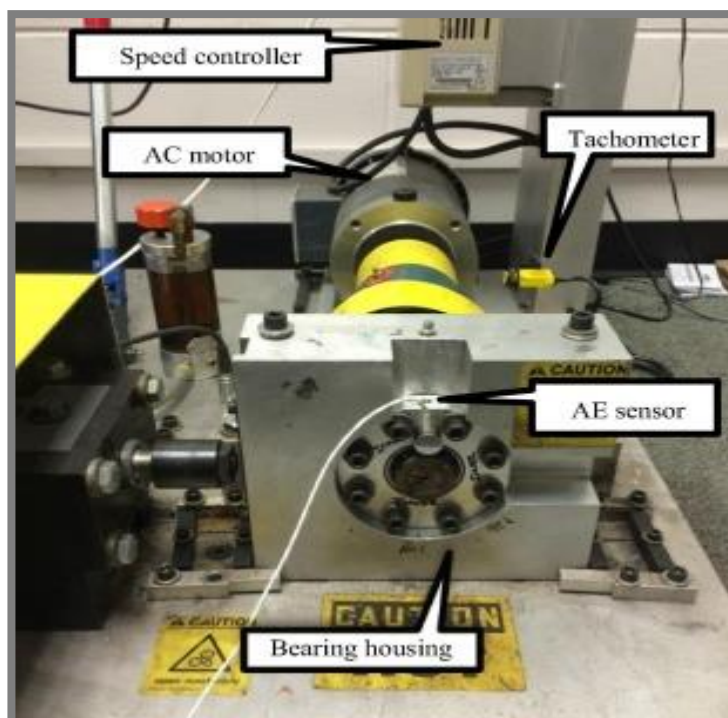
2.5.1

V štúdiu [10] zameranej na diagnostiku ložísk s defektom je preukázané, že aj pri nízkych otáčkach ložiska (>10 Hz) je možné, za použitia heterodynovej techniky, detekovať AE. Pri tomto experimente bola použita zariadenie (Obr. 2-7), ktorá umožňovala relatívne kvalitnú detekciu AE. Dôvodom je umiestnenie skúšaného ložiska (na konci hriadeľa). Pri úprave zaznamenávaného signálu sa totiž dajú odstrániť zložky



Obr. 2-7 Stanica pre skúšky pomalybežných ložísk [10]

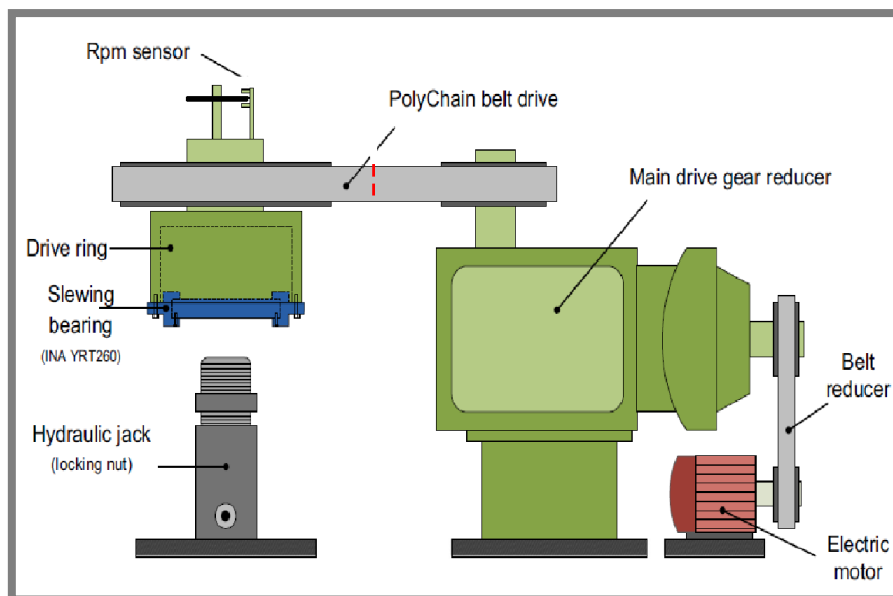
z určeného smeru [5]. Uloženie skúšaného ložiska na koniec hriadeľu tiež umožňuje veľmi jednoduchú výmenu ložiska bez demontáže väčšej časti stanice (Obr. 2-8). Na stanici je použitý aj tachometer pre získanie čo najadekvátnejších výsledkov. Zaťažovanie skúšaných ložísk je realizované hydraulickým systémom.



Obr. 2-8 Stanica pre skúšky pomalybežných ložísk [10]

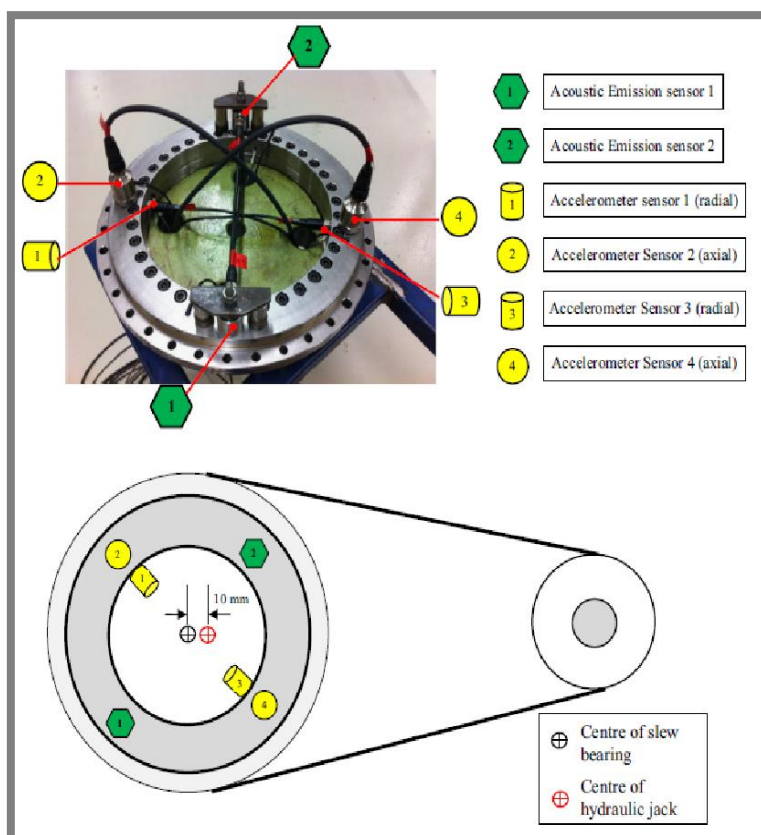
2.5.2 Konštrukcia vertikálnej stanice pre skúšky ložísk

V štúdiu [2] sa zaoberali pozorovaním AE, ktoré generujú otočné ložiská. Pri svojom



Obr. 2-9 Stanica pre skúšky otočných ložísk [2]

experimente zostavili experimentálne zariadenie (Obr. 2-9), ktoré umožňovalo rotáciu ložiska za použitia remeňového prevodu, ktorý eliminuje vibrácie z motora a



Obr. 2-10 Detail stanice pre skúšky otočných ložísk [2]

prevodovky. Zaťažuje sa za pomoci hydraulického valca. Rozloženie použitých

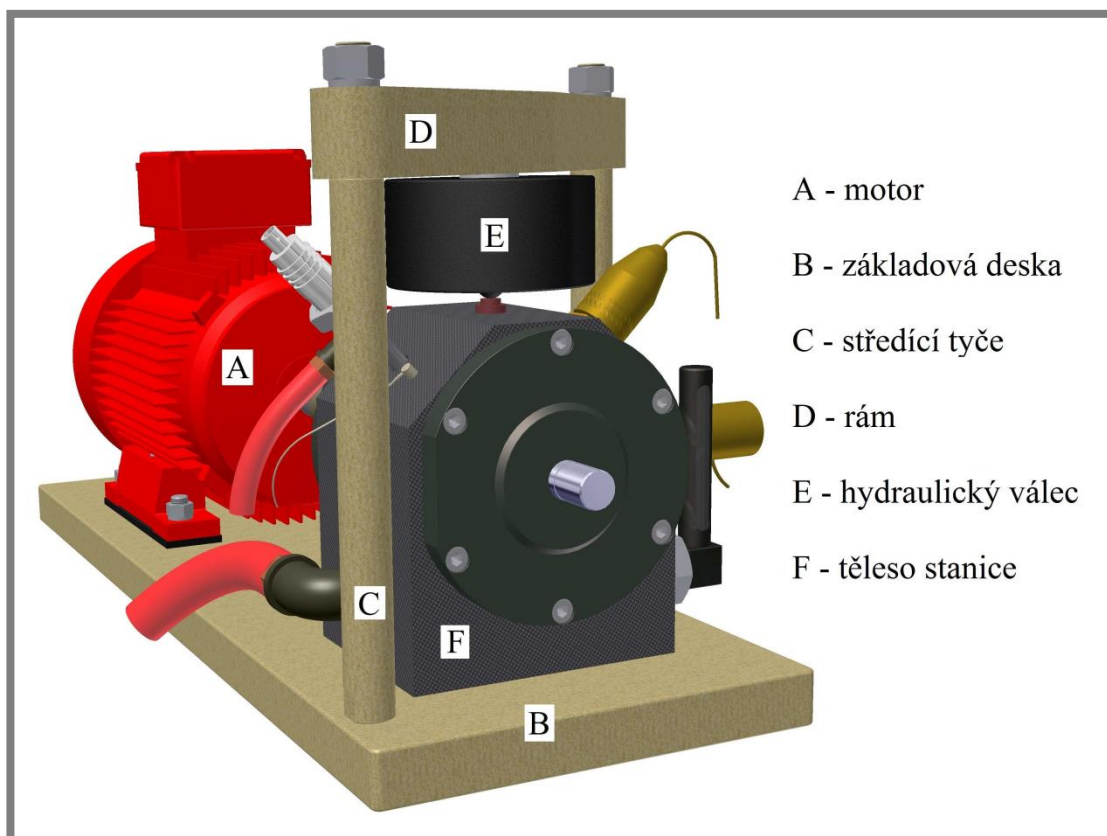
snímačov AE a akcelerometrov (Obr. 2-10) na ložisku je realizované tak, aby bolo možné presne detekovať miesto vznikajúceho defektu. Obr. 2-10 tiež značí miesto zaťažovania hydraulického valca. Zaťažovanie je excentrické z dôvodu vyššieho počtu generovaných udalostí AE (ložisko generuje viac vibrácií).

2.5.3 Konštrukcia stanice pre skúšky ložísk na VUT

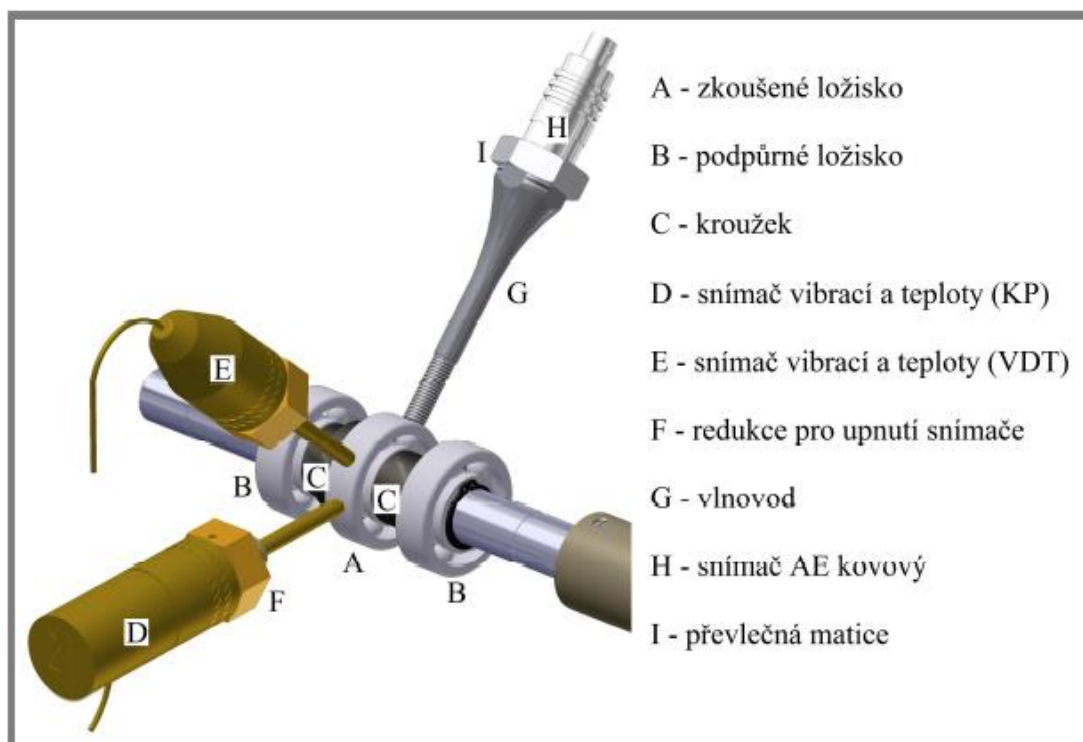
Ústav konstruování Fakulty strojního inženýrství disponuje laboratóriami na experimentálne skúšky ložísk a ložiskových materiálov. Jedná sa zväčša o stanice pre skúšky radiálnych ložísk s označením SA 67 (Obr. 2-11). Tieto stanice umožňujú skúšky radiálnych ložísk rôznych veľkostí, pričom medzné rozmery sú dané veľkosťou stanice [13]. Pre dlhodobé skúšanie ložísk je možné použiť olejovú kúpeľ nezakrytovaných ložísk. Stanica (Obr. 2-12) umožňuje skúšky vibračnej metódy a monitorovanie teploty. Vďaka modifikáciám stanice je tiež možné monitorovať AE (Obr. 2-13). Snímanie AE je realizované z povrchu skúšaného ložiska za pomoci vlnovodu a z povrchu skúšobnej stanice za pomoci magnetických snímačov. Zaťažovanie je taktiež realizované hydraulicky, z dôvodu potreby vyvinúť vysoké tlaky.



Obr. 2-11 Stanica pre skúšky radiálnych ložísk [13]



Obr. 2-12 Model stanice pro skúšky radiálních ložísk [13]



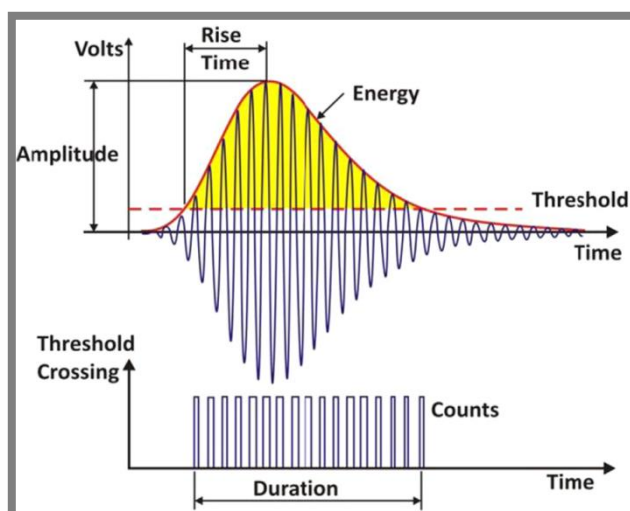
Obr. 2-13 Modifikovaný model stanice pro skúšky radiálních ložísk pomocou metody AE [13]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIELE PRÁCE

Podľa publikácií a výskumov je možno posúdiť výhodnosť metódy AE v skúšaní defektov ložísk. Pri porovnávaní s ostatnými metódami je metóda AE najcitlivejšou z hľadiska vzniku a šírenia defektu (Obr.3-1) [1].

Stanicu pre relatívnu kalibráciu snímačov AE, ktorá bude navrhovaná v tejto práci, možno prirovnať svojou konštrukciou k staniciam pre skúšky ložísk. Rozdielom je len opačná funkcia stanice. Taktiež je nutné podotknúť, že väčšina týchto staníc môže mať príliš vysokú hladinu šumu (vysokú úroveň okolitej AE). Dôvodom je prítomnosť rotačných častí, najmä podperných ložísk. Pre kalibráciu je potrebné mať čistý a jasný signál a preto by návrh stanice mal obsahovať čo najmenej častí vytvárajúcich šum a možnosť vyhovujúcich otáčok ložiska. Pri štúdiu možností rôznych staníc, sme zistili, že zníženie šumu sa dá doceliť použitím remeňového prevodu, ktorý eliminuje ako vibrácie, tak aj AE z elektromotoru [2]. Pre zníženie sa tiež dá navrhnúť konštrukcia tak, aby všetky nežiadúce, budiace zdroje AE boli umiestnené na odtenenej časti stanice. Snímač AE sa totiž dá nastaviť tak, aby signál z časti strane neprijímal [4]. Taktiež by bolo vhodné, aby prístupnosť k ložisku bola čo najjednoduchšia, z dôvodu možnej výmeny ložiska (zdroja AE).

Hlavným cieľom diplomovej práce je vytvorenie podmienok pre relatívnu kalibráciu snímačov AE na Ústave konštruovaní. Práca obsahuje dva podciele. Prvým je návrh a konštrukcia funkčnej stanice pre relatívnu kalibráciu snímačov AE na základe rotačného pohybu. Návrh tohto experimentálneho zariadenia bude vychádzať z konštrukcií staníc pre skúšanie ložísk. Toto experimentálne zariadenie musí spĺňať určité predpoklady pre spoľahlivú a presnú relatívnu kalibráciu, ktorá je realizovaná za pomoci rotačného pohybu ložiska ako zdroja AE. Tento typ AE bude meraný piezoelektrickými snímačmi umiestnenými na experimentálnom zariadení. Experimentálne zariadenie bude umožňovať umiestnenie senzorov na viacerých miestach kalibračnej časti a možnosť rôzneho typu upevnenia (magnetické, prilepenie, vlnovod). Cieľom bude na základe zaznamenaného signálu hodnotiť a kategorizovať snímače AE. Posudzovaný bude taktiež vplyv väzobného média medzi snímačom, kalibračnou časťou a ložiskom.



Obr. 3-1 Parametre AE hitu pre jednu udalosť [2]

Druhým podcieľom je vytvorenie a praktické overenie metodiky kalibrácie piezoelektrických snímačov AE, používaných pri skúškach kontaktnej únavy a trvanlivosti ložísk, ktorými disponuje laboratórium pre AE na ÚK VUT v Brne. Podstatou bude rozdeliť senzory AE do viacerých kategórií, na základe ich výstupných signálov za pomoci skonštruovaného zariadenia pre kalibráciu.

Ústav konštruování disponuje cca 50 kusmi snímačov rôznych typov a rôzneho roku výroby. Tieto snímače je nutné pravidelne hodnotiť a určovať ich použiteľnosť, a nastavovanie parametrov (zosilnenie signálu, rozsah frekvencie...) meracieho zariadenia pre ich správnu funkciu.

Diplomová práca sa delí na dva hlavné ciele, ktoré sa dajú rozdeliť do nasledovných dielčích úloh:

Konštrukcia experimentálneho zariadenia:

- Koncepčné návrhy zariadenia pre kalibráciu
 - Výber a realizácia najvhodnejšieho riešenia
 - Test vlastností a overenie správnej funkcie zariadenia
-

Metodika hodnotenia:

- Kalibrácia vybranej skupiny snímačov AE na funkčnom zariadení
- Vyhodnotenie a kategorizácia vybranej skupiny AE snímačov dostupných v ÚK
- Návrh metodiky hodnotenia snímačov AE

4 MATERIÁL A METÓDY

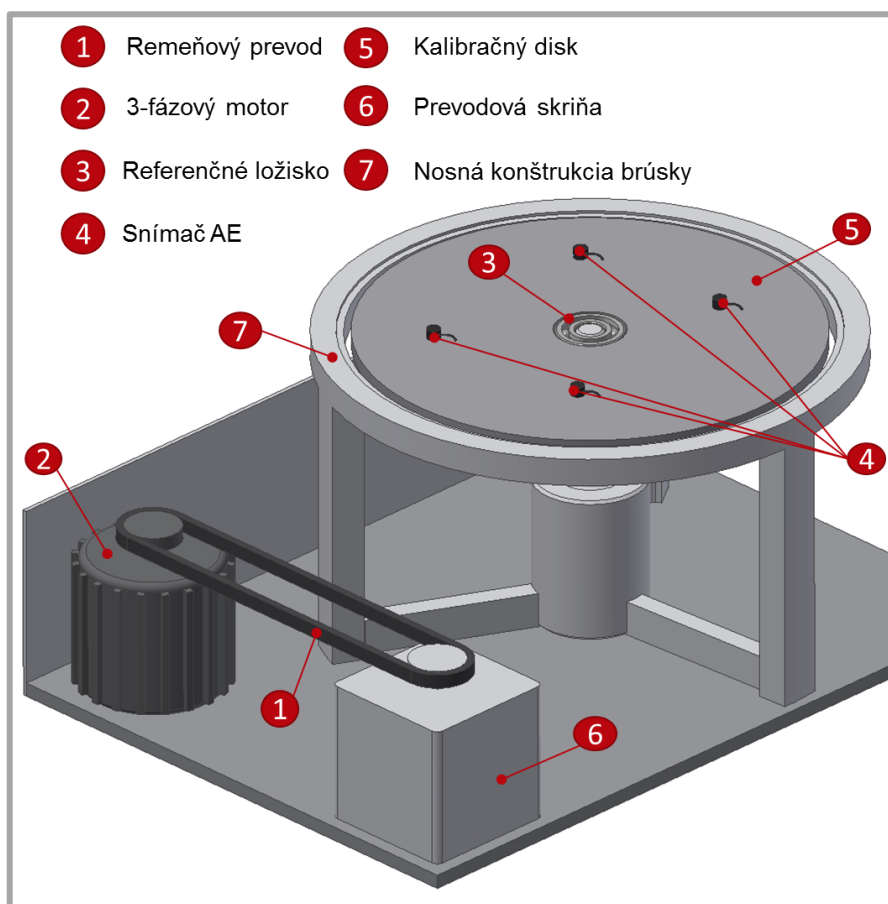
Prvým cieľom diplomovej práce je konštrukcia experimentálneho zariadenia, ktoré (za použitia rotačného pohybu ako zdroju AE) umožňuje kalibráciu snímačov AE. Návrh konštrukcie vychádza zo zariadení používaných pri diagnostike ložísk metódou AE, uvedených v kapitole 2. Hlavným prvkom je rotačné teleso (ložisko), ktoré generuje spojité AE.

4.1 Návrh konštrukcie experimentálneho zariadenia

Návrh experimentálneho zariadenia pre kalibráciu ložísk je možno rozdeliť do dvoch hlavných koncepčných riešení na základe orientácie osy hriadeľa. Zvažovala sa možnosť umiestnenia osy rotácie horizontálnym alebo vertikálnym spôsobom. Taktiež sa zariadenie navrhovalo ako nízko nákladové. Ďalšou požiadavkou použitie poškodených ložísk (zdroj AE). Poškodené ložisko generuje vyššie hodnoty AE [10]. Nie je preto vhodné, aby toto ložisko plnilo nosnú funkciu.

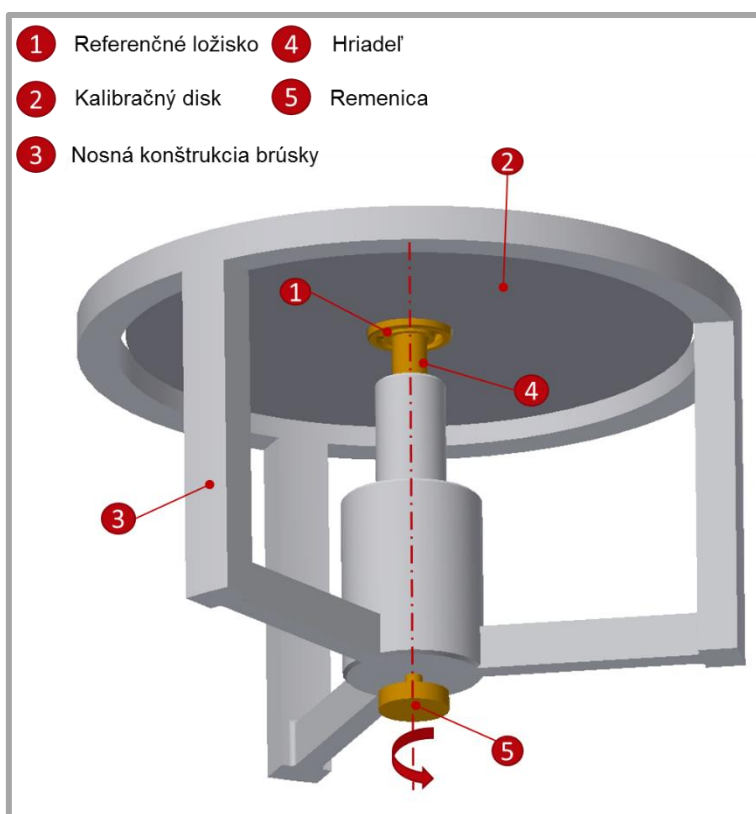
4.2 Koncepčné riešenie č. 1

Koncept bol navrhnutý ako modifikácia metalografickej brúsky, vyradenej z prevádzky na UMVI a predanej na pracovisko ÚK. Jedná sa o zariadenie s nosným rámom (Obr.4-1), ktorý by niesol ložisko a kalibračný disk. Pri tejto variante sa použila možnosť regulovať rýchlosť otáčania za pomoci prevodovky, ktorú



Obr. 4-1 Koncept experimentálneho zariadenia vzniknuté modifikáciou metalografickej brúsky

metalografická brúska obsahuje. Prevod medzi elektromotorom a prevodovkou je realizovaný remeňovým prevodom. Remeňový prevod sa nachádza aj medzi prevodovou skriňou a hriadeľom (pod základovou podstavou). Tieto prevody zaistia elimináciu vibrácií. Zariadenie umožňuje vyvinúť tlak na ložisko vyosením kalibračného disku z centrálnej pozície na excentrickú. Na obr. 4-2 je zobrazenie rotačného pohybu, ktorý vykonáva hriadeľ a ložisko. Kalibračný disk ostáva počas prevádzky nehybný a preto je umiestňovanie snímačov AE na jeho povrch



Obr. 4-2 Rotačné prvky koncepčného riešenia (oranžová farba značí rotačné prvky)

realizovateľné. Výhodou je použitie ložísk s väčšími rozmermi. Nevýhodou tohto zariadenia je hmotnosť, takže zariadenie by nebolo byť prenosným.



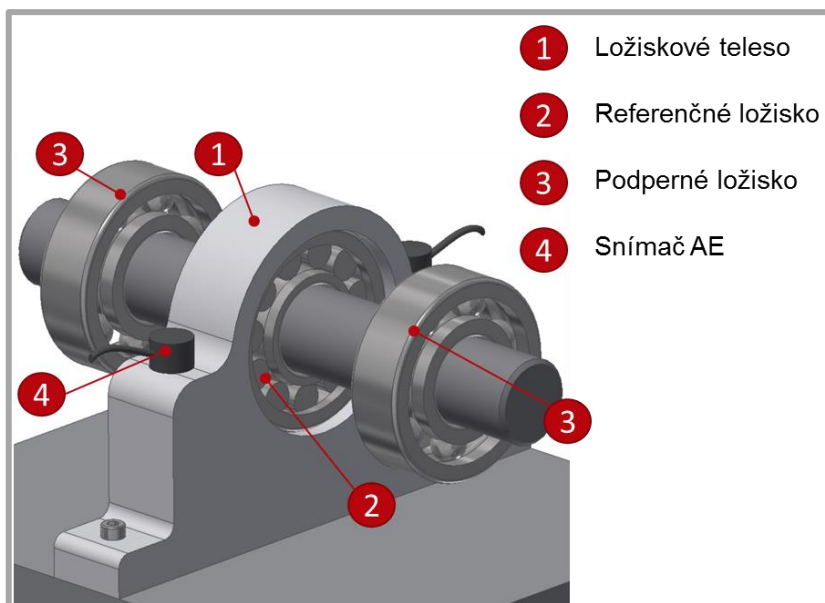
Obr. 4-3 Skelet metalografickej brúsky

4.3 Konceptné riešenie č. 2

Druhé konceptné riešenie bolo založené na princípe horizontálneho smeru osy rotácie. Bolo vybraných niekoľko modelov kalibračných častí zariadenia, ktoré sú ideálne pre pozorovanie AE.

4.3.1 Modely kalibračnej časti

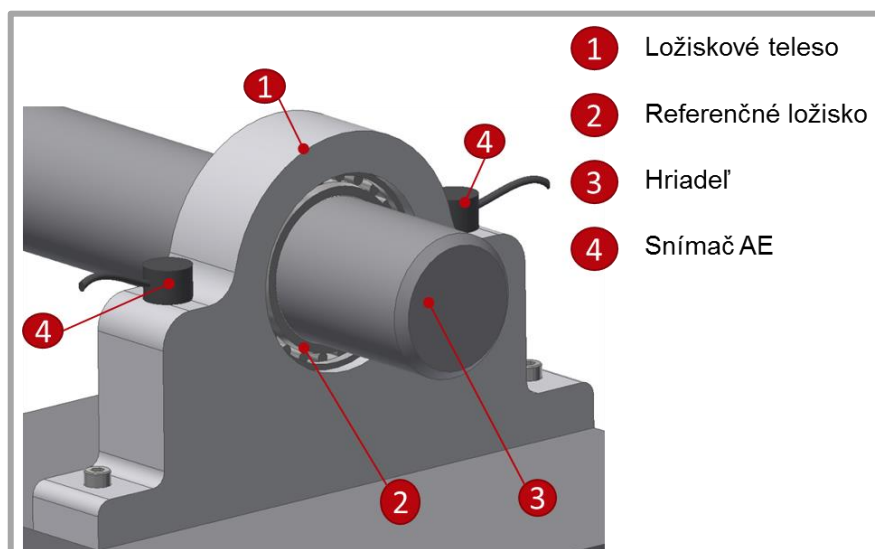
Dôležitou požiadavkou je zredukovanie šumu tvoreného pohyblivými prvkami. Zariadenie preto musí obsahovať minimálny počet rotačných prvkov ako sú podperné ložiská (Obr. 4-4) a konštrukcia by mala generovať len AE z rotačného pohybu



Obr. 4-4 Model kalibračnej časti s podpernými ložiskami

ložiska, ktoré je určené ako zdroj AE. Ideálnym prípadom je generovanie len veľmi malej AE okolitých prvkov zariadenia.

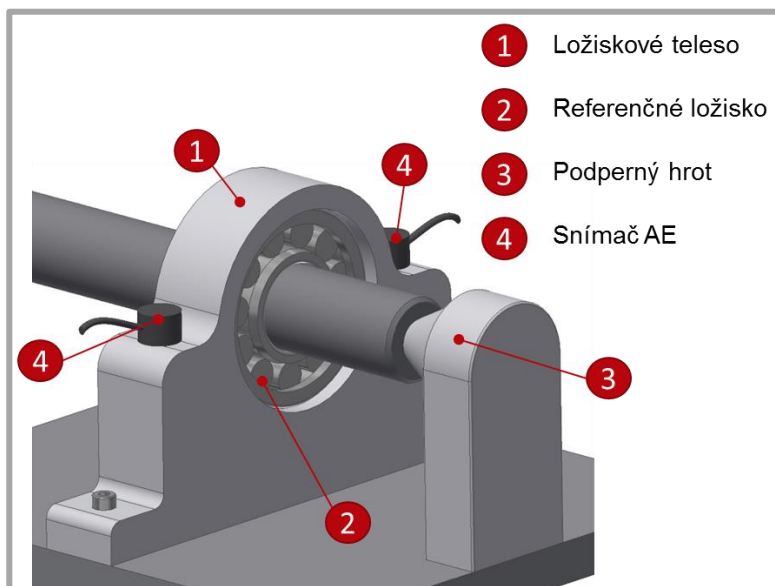
Druhým modelom je varianta s voľným koncom hriadeľa (Obr. 4-5). To zaisťuje redukciiu okolitého šumu. Jediným rotačným prvkom je pri tejto variante je ložisko, ktoré je zdrojom AE. Táto možnosť však vedie k nutnosti vyššej tuhosti hriadeľa alebo



Obr. 4-5 Model s voľným koncom hriadeľa

k vyššej tuhosti ložiskového domku pre experimentálne ložisko. Nie je vhodné aby pri použití poškodeného experimentálneho ložiska nieslo hmotnosť hriadeľa. Výhodou tejto varianty je jednoduchá montáž a demontáž experimentálnych ložísk.

Tretou variantou je model s použitím podperného hrotu (Obr. 4-5). Ten generuje výrazne slabšie AE z dôvodu absencie valivých prvkov a zaisťuje polohu osy rotácie. Podperný hrot však nemôže spĺňať funkciu nosného prvku.

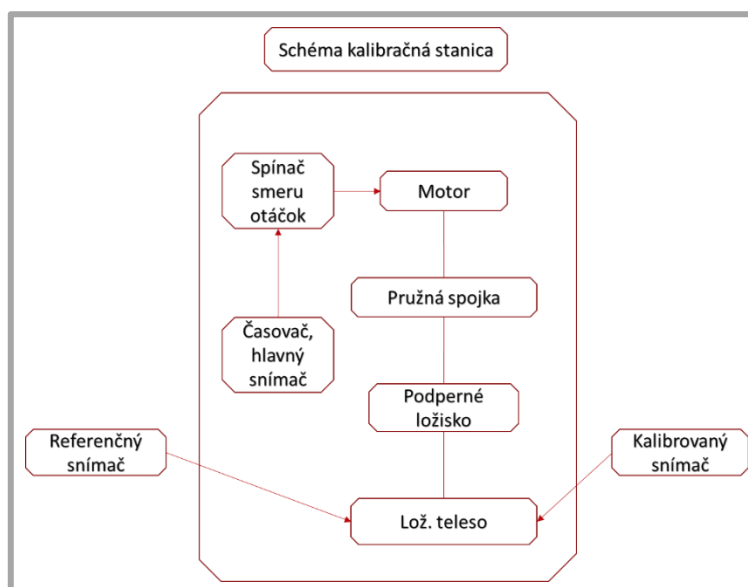


Obr. 4-6 Model s podperným hrotom

4.3.2

4.3.2 Favorizované riešenie

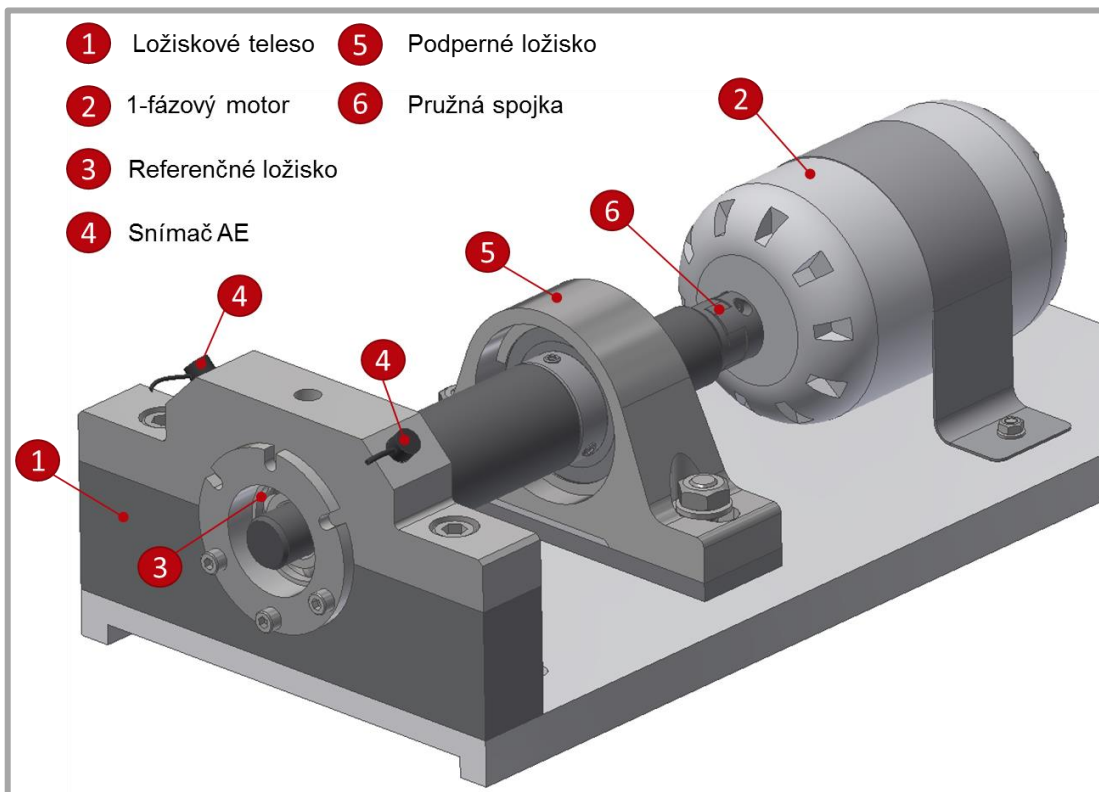
Na základe uvažovaných variant kalibračnej časti zariadenia sa došlo ku zostavení favorizovaného riešenia experimentálneho zariadenia (Obr. 4-7). Jedná sa o horizontálne orientovanú os rotácie, čo umožňuje jednoduchšiu montáž a demontáž



Obr. 4-7 Schéma experimentálneho zariadenia

experimentálnych ložísk ako u koncepčného návrhu č.1. Zariadenie (Obr.4-8) obsahuje podperný ložiskový domek, ktorý slúži ako nosný prvok hriadeľa. Je nutné prihliadať aj k možnému šumu z hľadiska vibrácií, ktorých zdrojom je elektromotor.

Tieto vibrácie boli eliminované použitím pružnej spojky, ktorej pružný člen má schopnosť pohlcovať vibráciu. Toto zariadenie umožňuje využitie poškodených ložísk

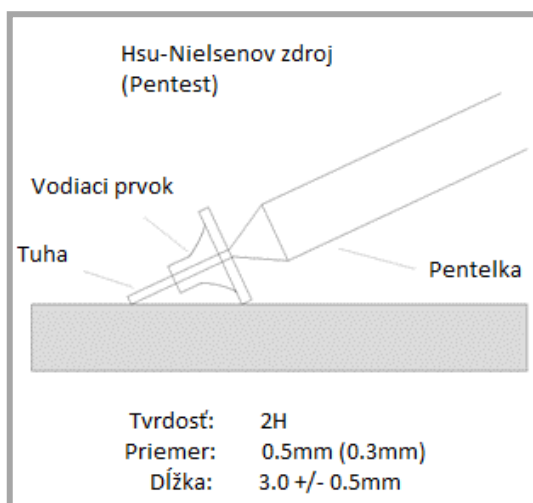


Obr. 4-8 Favorizované riešenie

ako zdroju AE. Elektromotor sa jednofázový motor, ktorého otáčky sú postačujúce pre rozbeh a prevádzku hriadeľa. Použil sa taktiež hriadeľ s osadením, umožňujúci upnutie guľkových, valčekových, ale aj ihlových experimentálnych ložísk.

4.4 Hsu-Nielsenov zdroj (Pen-test)

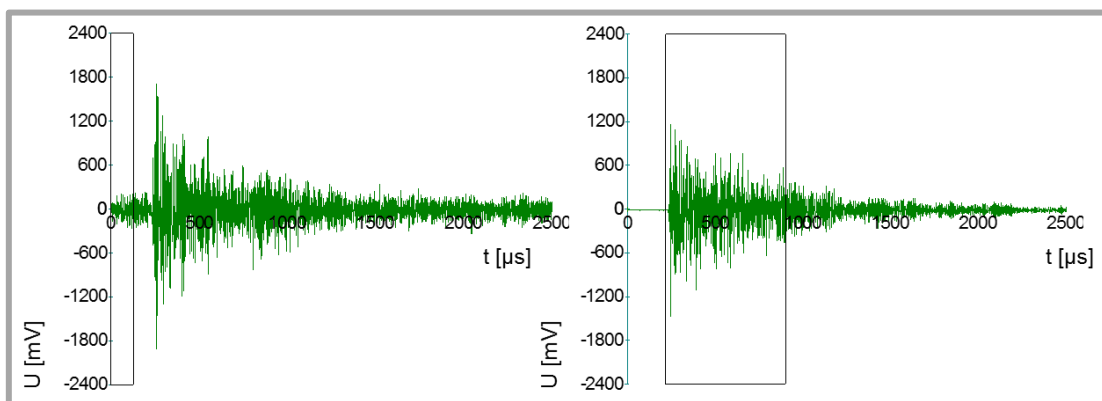
Prvým krokom pri zostavovaní metodiky je určovanie referenčných snímačov. Tým musí byť snímač s najlepšou citlivosťou. Za týmto účelom sme použili tzv. Hsu-Nielsenov zdroj (Pen-test Obr. 4-9), ktorý má presne definovanú udalosť AE. Jedná sa



Obr. 4-9 Hsu-Nielsenov zdroj

o burst, teda prasknutie tuhy. Pen-test slúži ako udalosť AE, s ktorým sa bežne kontroluje lokalizujú defekty a reakcia snímačov AE. V tejto práci sa zisťovali potrebné informácie k stanoveniu referenčného snímača pre triedu MDK-13.

Keďže burst je udalosť AE s vysokou odozvou signálu, je vhodné využiť skúšobné teleso, kde je zaručená presná odozva signálu. Ideálnym prostriedkom sú telesá



Obr. 4-10 Hity AE získané Hsu- Nielsenovým zdrojom

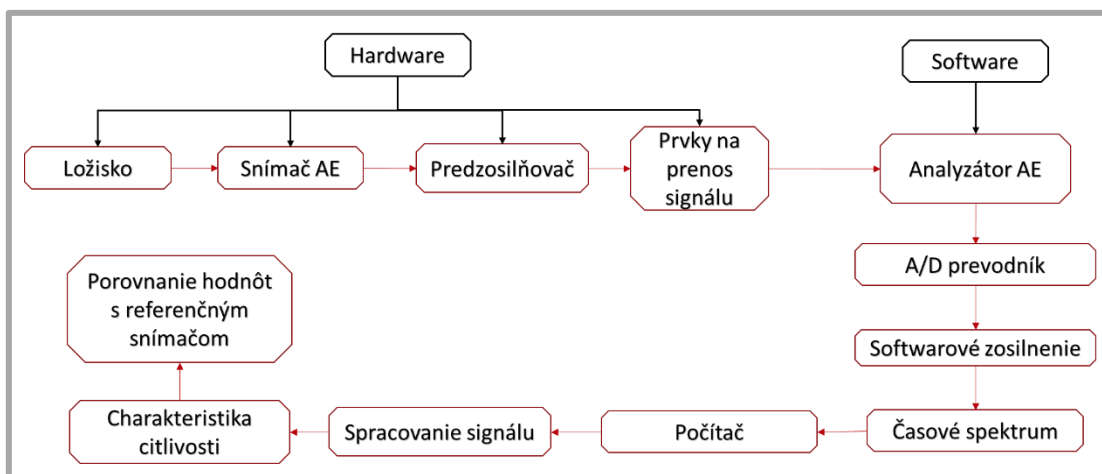
s malou hrúbkou... Jednalo sa taktiež o zistenie odozvy signálu a základe tohto merania definovať najcitlivejší snímač podľa tejto metódy. Tento experiment sa aplikoval aj na kalibračnú časť zariadenia, pre zistenie odozvy signálu. Avšak pri pentestoch sa signál považuje za nekontinuálny, čo znamená, že udalosť AE má charakter ojedinelej elastickej vlny prechádzajúcej telesom. Na obrázku 4-10 sú zobrazené Hity AE. Rozdielom medzi hitom AE a udalosťou AE je v tom, že udalosť AE je fyzikálneho charakteru, hit AE je elektrickou odozvou snímača na danú udalosť.

4.5 Metodika hodnotenia snímačov AE

4.5

Relatívna kalibrácia sa realizuje na základe porovnania zvoleného referenčného snímača so snímačom určeným pre kalibráciu. Pre možnosť čo najpresnejšej kalibrácie a posudzovania snímačov AE potrebujeme overiť chovanie ložísk pri zaťažovaní alebo využiť metódu úmyselne poškodených ložísk.

Typ ložísk sa v experimentálnom zariadení bude meniť na základe metodiky hodnotenia. Tá musí zodpovedať určitému meraciemu reťazcu (Obr. 4-11).



Obr. 4-11 Merací reťazec pre kalibráciu

Merací reťazec obsahuje dve časti. Získanie AE a jej nasledovné vyhodnocovanie. Po sérii meraní sa stanoví úprava vstupných parametrov meracieho zariadenia. Pri zmene týchto parametrov dochádza aj k zmene chovania snímača na danú udalosť AE z hľadiska citlivosti. Týmto spôsobom sa definuje určitá charakteristika, definujúca citlivosť daného snímača. Následne bude táto charakteristika porovnaná s charakteristikou referenčného snímača a posúdený jej stav citlivosti. Tak možné sledovať degradačný čas snímačov AE. Hlavným parametrom ovplyvňujúcim citlivosť snímačov je softwarové zosilnenie analyzačnej jednotky.

4.5.1 Systém DAKEL XEDO (Zariadenie pracujúce na countovom princípe zaznamenávania udalostí AE)

Je to univerzálny merací a diagnostický systém [14], ktorý má široké využitie pri všetkých aplikáciách merania fyzikálnych veličín. Tento systém umožňuje jednoduché pripojenie až niekoľko desiatok meracích modulov k počítaču a tak centrálné monitorovať stavy meraných objektov. Je taktiež určený pre spracovanie súborov dát pri meraní AE.

Hlavným stavebnými prvkami sú meracie a komunikačné jednotky (karty), ktoré spolu tvoria softwarový merací prvok (box) schopný kombinovať rôzne druhy merania súčasne. Prenos nameraných dát do riadiacej jednotky (počítač) zabezpečuje komunikačná jednotka. V rámci tohto boxu prebieha komunikácia medzi jednotkami po zbernici, ktorá poskytuje všetkým riadeným jednotkám informáciu o čase (presnosť 1 μ s).

Jednotka pre vyhodnocovanie parametrov AE

Po pripojení snímača AE umožňuje meranie základných parametrov AE (Max. amplitúda, Risetime, Count, RMS), spracovanie emisných udalostí s možnosťou ich presnej lokalizácie a priame digitálne vzorkovanie emisných signálov (2-8 MHz) [16]. Avšak je nutné zdôrazniť, že jednotlivé kanály týchto jednotiek majú ma určitom čase istý stupeň degradácie, zvýšenú hladinu šumu, čo môže mať za následok, že počiatočná hladina jednotlivých kanálov nebude identická. Pre kalibráciu sa jedná o dôležitý poznatok, ktorý sa musí zohľadňovať.



Obr. 4-12 Systém DAKEL XEDO

Meracie zariadenie (Obr. 4-12) na ÚK, ktoré bolo použité pri meraní je 4 kanálová jednotka, ktorej kanály nemajú jednotnú počiatočnú hladinu. Experimentálnym meraním sa taktiež zisťoval vplyv použitých snímačov na počiatočnú hladinu záznamu odozvy.

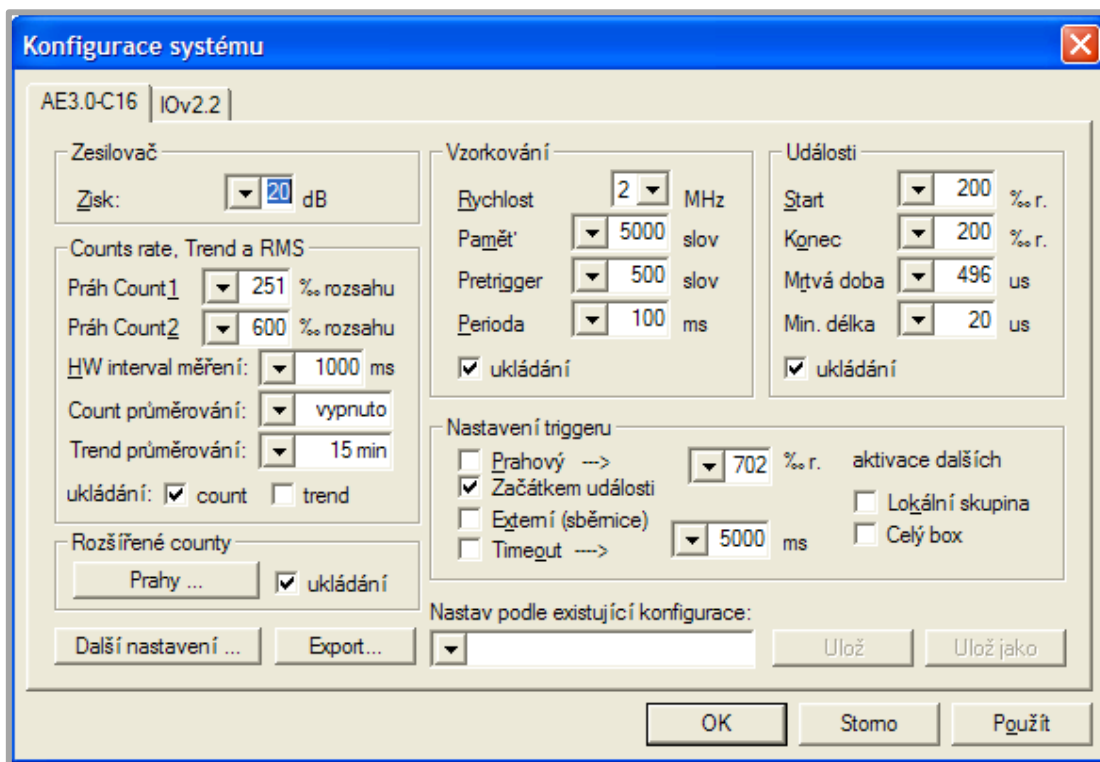
4.5.2 Program Xedo Daemon a Daeshow

4.5.2

Jedná sa o softwarové nástroje systému Dakel Xedo potrebné pre snímanie, vyhodnocovanie a analýzu súborov dát získaných snímačmi AE.

Daemon sa používa na nastavovanie parametrov merania na sledovanie experimentov v reálnom čase. To umožňuje nastavovať parametre merania a prispôbiť ich potrebám cieľov. Tento program umožňuje rozsiahlu konfiguráciu vstupných parametrov, ktoré sa nastavujú na základe typu meranej udalosti AE. Experimentálna časť tejto práce používala konfiguráciu systému zobrazenú na obr. 4-13. Vzorkovacia frekvencia bola pre kalibráciu nastavená na hodnotu 2 MHz.

Program Daeshow je vyhodnocovací program, ktorý za pomoci FFT transformácie presúva dáta z časového spektra do frekvenčného. Umožňuje tak stanovovanie



Obr. 4-13 Nastavenie konfigurácie systému v programe Daemon

frekvenčných charakteristík odozvy signálu. Umožňuje taktiež náhľad na zaznamenané merania a v neposlednej rade export binárnych dát. Využívaný v tejto práci.

4.5.3 Postup merania

4.5.3

Rotácia ložiska je v oblasti metódy AE (defektoskopie) uvažovaná ako kontinuálny priebeh uvoľňovania energie, ktorý je vyhodnocovaný ako spojitá AE. Bolo potrebné stanoviť vyhodnocovací parameter popisujúci priebeh spojitej AE. Touto vlastnosťou sa vyznačuje hodnota RMS (Root mean square) signálu. Jedná sa o aritmetický

priemer prijatej energie za jednotku času snímačom, ktorá je nasledovne prevedená na elektrický signál.

Pri skúškach citlivosti normalizovanou metódou Hsu-nelsonovym zdrojom je možné posudzovať reakciu snímača na burst, avšak nedá sa sledovať hodnota prijatej energie, keďže sa pri burstu jedná o nespojitú AE.

Pri postup meraní sa bral ohľad na niekoľko najpodstatnejších princípov.

1. Umiestnenie snímača
2. Druh poškodenia ložiska
3. Prítomnosť väzbového média
4. Smer rotácie ložiska
5. Časová skúška

Umiestnenie snímača

Keďže AE nie je snímaná z povrchu ložiska, je meranie ovplyvnené pozíciou snímača. Cieľom bolo určiť empirickým spôsobom také miesto, na kalibračnom telese, ktoré by snímalo ideálnu hodnotu parametru RMS.

Druh poškodenia ložiska

Metoda AE je natoľko citlivá, že je schopná rozpoznávať aj veľmi malé poškodenia na meranom telese a preto sa rozhodlo pre kalibráciu použiť ložiská s určitým druhom defektu. Toto poškodenie nebolo vytvorené prirodzene, ale úmyselným poškodením vybranej časti ložiska z dôvodu stanovenia presnej odozvy signálu na daný typ poškodenia.

Prítomnosť väzbového média

Väzbové médium spoľahlivo zaisťuje prenos elastickej vlny z povrchu telesa k snímaču. Je dôležitým prvkom, ktorý značne zvyšuje efektivitu metódy AE. Je však možné, že na kalibráciu vybraných magnetických snímačov nebude potrebné jej využitie. Preto sa experimentálne overovala možnosť kalibrácie „na sucho“.

Smer rotácie ložiska

Elastické vlny sa pri rotácii ložiska šíria po celom objeme. Predpokladá sa, že pri otáčaní ložiska je šírenie ovplyvnené zmyslom rotácie. Konkrétne smerom pohybu valivých elementov, umiestnených v kletke ložiska.

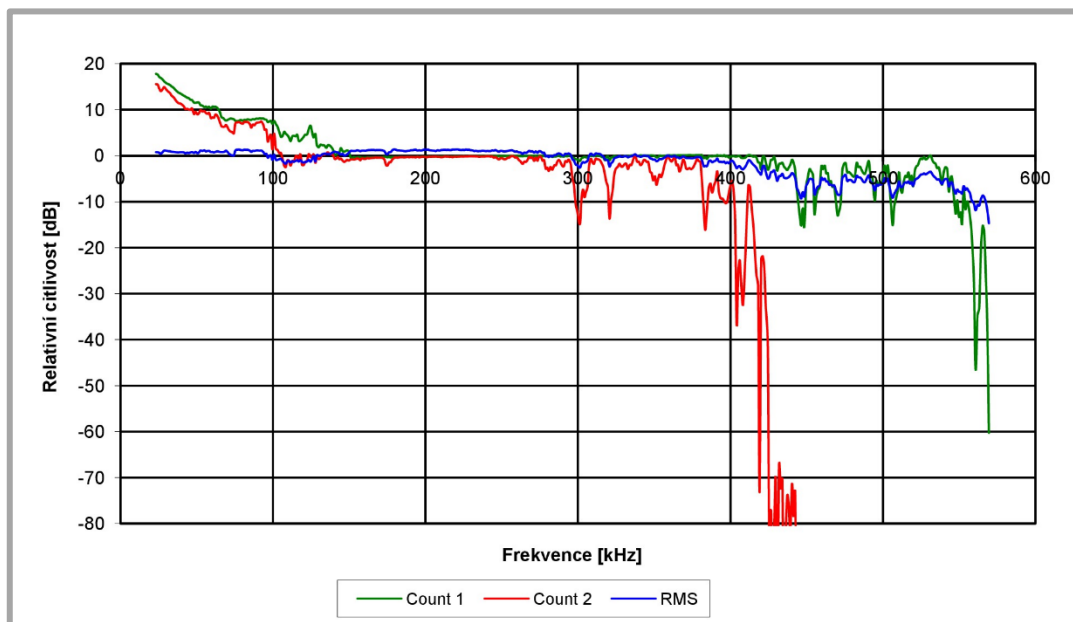
Časová skúška

Jedná sa o experimentálne určenie vplyvu času na prijatú energiu a teda na hodnotu RMS. Pri čase určeným pre kalibráciu sa nesmie prijatá energia samovoľne meniť. Preto sa skúšky budú realizovať pri 2 a 5 minútovom sledovaní RMS.

4.5.4 Vyhodnocovací postup

Bol zostavený na základe čo najefektívnejšieho vyhodnocovania nameraných dát. V programe DaeShow vytvorený firmou Dakel, je možný export binárnych dát do textových editorov. S týchto editorov boli následne dáta prevedené a separované do vyhodnocovacieho programu MS Excel.

Podľa kalibračných protokolov firmy Dakel snímača MDK-13 by malo pri vyššej frekvencii ako 400 kHz dochádzať k miernemu poklesu citlivosti a teda aj k poklesu prijatej energie snímačom a signálu RMS (Obr. 4-14).



Obr. 4-14 Příklad frekvenční charakteristiky typu MDK-13

4.5.5 Použité softwarové zesílenie

Zmena hodnoty RMS sa menila na základe zmeny poškodeného ložiska. V závislosti na type poškodenia sa výsledná RMS zvyšovala resp. znižovala.

Keďže hlavným konfiguračným parametrom ovplyvňujúcim citlivosť snímačov je softwarové zesílenie, prebiehali experimenty pri zmene tohto parametru.

V základných experimentoch boli použité softwarové zesílenia 0, 5, 10, 15, 20 dB.

4.5.5

4.5.6 Použité ložiska

Zariadenie umožňuje upnutie 3 typov snímačov. Pre potreby experimentu boli vybrané 4 ložiská rovnakého typu s označením 6204, ktorých rozdielnosť odozvy signálu bola zaručená určitým typom poškodenia.

Prvým použitým ložiskom bolo ložisko s poškodenou kľetkou, ktorá sa mechanicky porušila.

Druhým typom poškodenia bol úmyselne vytvorený pitting na vonkajšom krúžku ložiska. Ten vznikol vyiskrením ryhy na vnútornej strane vonkajšieho krúžku kolmej k smeru valenia valivých elementov ložiska.

Tretím typom bolo ložisko s poškodením vnútorného krúžku. Vzniklo rovnakým spôsobom ako ložisko s poškodením vonkajšieho krúžku. Rozdiel medzi týmito poškodeniami je, že poškodenie vnútorného krúžku, teda krúžku ktorý rotuje, generuje väčšie AE. Dôvodom je, že pri rotácii vnútorného krúžku a valení elementov dochádza k častejšiemu stretu pittingu s elementmi. To je taktiež dôvod vyššej úrovne hluku tohto ložiska. Pri experimentoch bola na základe generovania AE týmto ložiskom zaznamenávaná najvyššia hodnota RMS, takže to poškodenie bolo najväčšie.

Štvrtým ložisko je funkčné a nepoškodené ložisko. Boli zisťované hodnoty RMS, ktorých dosahuje generované ložisko bez poškodenia.

4.5.6

4.5.7 Použité snímače

Jedná sa o magnetické snímače firmy Dakel s označením MDK-13, ktoré obsahujú interný predzosilovač so zosilnením cca 35 dB [19]. Ich rezonančná frekvencia sa



Obr. 4-15 Snímače použité pri kalibrácii

pohybuje v rozmedzí 200-250 kHz, avšak jedná sa o širokopásmne snímače AE, ktorých rezonančná frekvencia je potlačená zatlmením. Kontaktná plocha snímačov je 13 mm. Tieto snímače sa používajú pri diagnostike valivých ložísk na Ústave konštruování.

5 VÝSLEDKY

5

Táto kapitola je venovaná výsledkom dosiahnutých v tejto diplomovej práci. Kapitola pojednáva o výslednom návrhu experimentálneho zariadenia, jeho zostavení a rozpisu prvkov zariadenia. Experimentálna časť tejto práce sa zaoberá sériou základných meraní následne popisu vyhodnocovacieho postupu, zostavením charakteristík citlivosti snímačov používaných pri experimentoch. Posledná časť je venovaná návrhu metódy kalibrovania snímačov zo pomoci experimentálneho zariadenia.

5.1 Konštrukčná časť

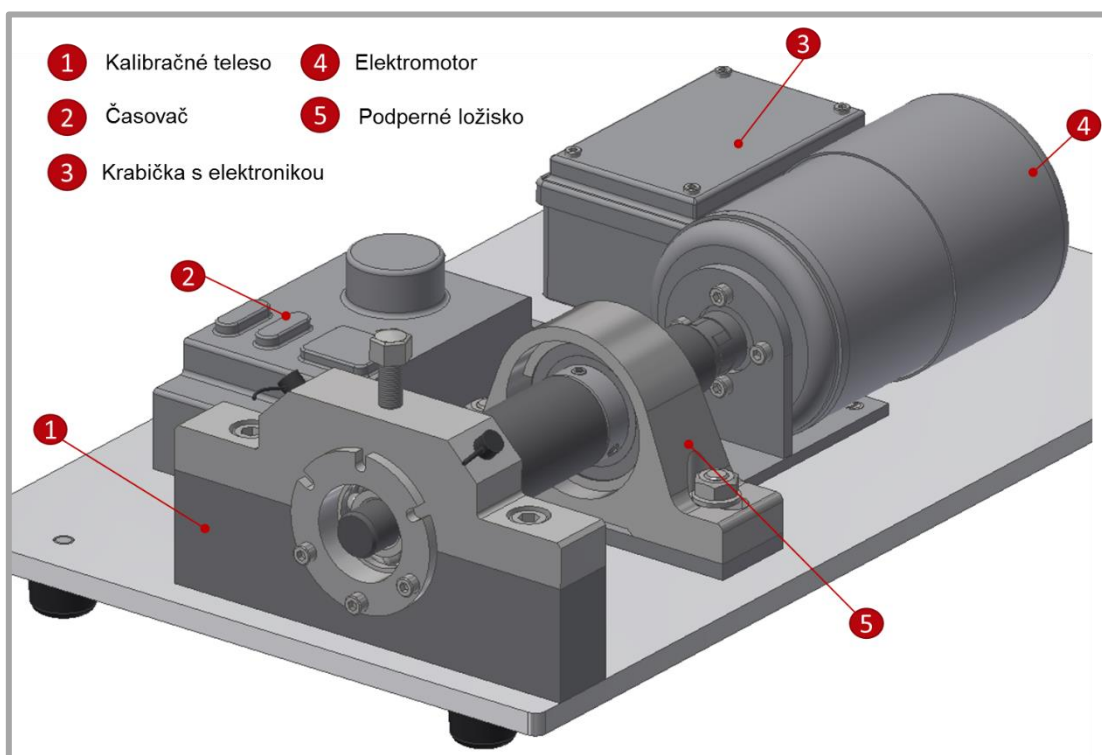
5.1

Táto časť sa zaoberá zostavovaním experimentálneho zariadenia a odôvodnením použitia jednotlivých komponentov.

5.2 Favorizovaný návrh

5.2

Ako favorizované riešenie bol zvolený koncepčný návrh č. 2. Hlavným dôvodom boli nízke náklady na výrobu, jednoduchosť konštrukcie a v neposlednej rade funkčnosť. Taktiež zodpovedá požiadavku prenosného zariadenia. Návrh experimentálneho zariadenia je prispôbený trom typom ložísk (gul'kové 6204, valčekové NU204 a ihlové NK 25/22). Gul'kové a valčekové ložiska je možné uložiť na priemer $d = 20$ mm (Obr. 5-1), čo je štandardné umiestnenie kalibračného telesa. Zariadenie umožňuje

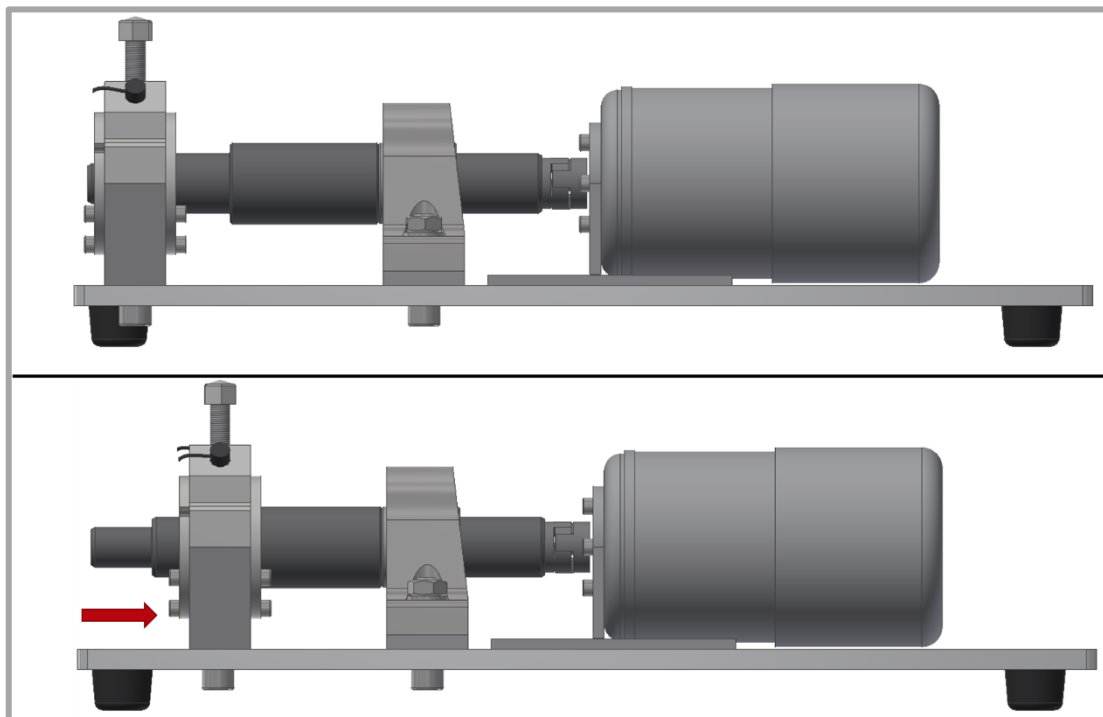


Obr. 5-1 3D model experimentálneho zariadenia

taktiež tieto ložiska radiálne zaťažovať. Toto zaťažovanie je realizované jednoduchým spôsobom za použitia závitovej skrutky. Za pomoci momentového kľúča je možné vyvolať na referenčné ložisko tlak i v priebehu merania a zvýšiť tak hodnoty RMS.

Tým je možné pozorovať reakciu snímačov AE na zmenu RMS počas experimentov a meniť tak hodnotu prijatej energie snímačmi.

Pre upnutie ihličkových ložísk je nutné umiestniť kalibračné teleso na väčšie osadenie hriadeľa $d=25\text{mm}$ (Obr. 5-2).



Obr. 5-2 Posunutie kalibračnej časti pre možnosť uloženia ihličkových ložísk

Dôležitú úlohu má väzobné médium, ktoré sa bude aplikovať do kontaktu ložisko-hniezdo a hniezdo-snímač. Vo väčšine prípadov sa ako väzobné prostredie používa technická vazelína. Vazelína však musí byť nanášaná len v určitom množstve ($50\text{--}100\mu\text{m}$). Pri nanesení väčšieho množstva väzbového média dochádza ku nežiadúcej strate AE.

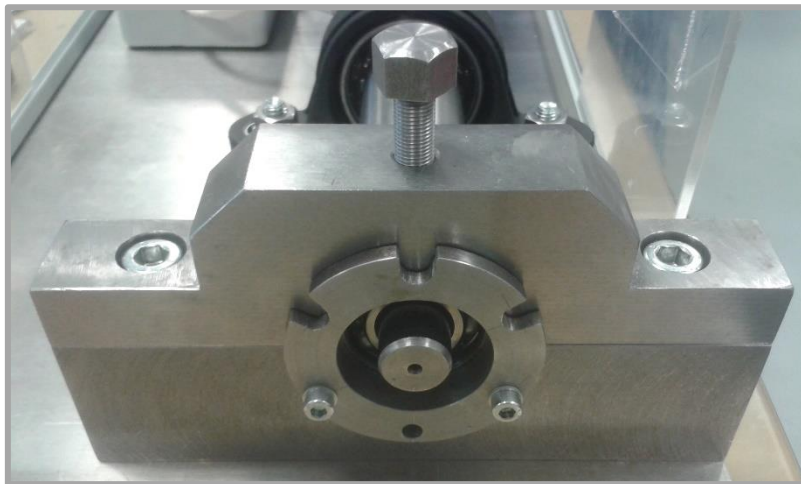
Zariadenie musí byť taktiež opatrené tlmiacimi prvkami. Vibrácie z elektromotoru by mohli negatívne ovplyvňovať hodnoty RMS, čo bude mať za následok komplikácie pri základných experimentoch.

5.3 Kalibračné teleso

Jedná sa prvok experimentálneho zariadenia, ktorý je hotovený tak, aby na jeho povrch bolo možné umiestniť snímače AE, ktorých kontaktná plocha dosahuje 17 mm . Do Kalibračného telesa (Obr. 5-3) sa umiestňuje referenčné ložisko, ktoré slúži ako hlavný zdroj AE pre relatívnu kalibráciu snímačov AE. Je nutné, aby kalibračné teleso bolo symetrické z hľadiska plynulého šírenia elastických vĺn a taktiež z požiadavku rovnakej vzdialenosti od zdroja pri relatívnej kalibrácii [4].

Ako základný materiál bola zvolená oceľ S335 (11 600). Kalibračné teleso sa skladá z dvoch častí, pre rýchlu výmenu referenčných ložísk.

Kontakt ložisko-kalibračné teleso-snímač zaručuje prenos elastických vln od zdroju AE až k snímaču. Kontakt snímača s povrchom má veľmi dôležitý vplyv na výsledný elektrický signál. Preto je dosadací povrch pre snímače brúsený na drsnosť $Ra\ 3,2$.



Obr. 5-3 Kalibračné teleso

Za pôsobenia interného magnetu kalibrovaných snímačov a adhézie väzbového média je prenos AE zaručený.

Snímače je možné umiestniť prakticky na akékoľvek miesto na telese. Pre základné experimenty však boli zvolené úkosity (Obr.5-4), ktorých povrch je vo vzdialenosti



Obr. 5-4 Umiestnenie snímačov na experimentálne zariadenie

50mm od osy rotácie ložiska. Kalibračné teleso umožňuje jednoduché upnutie na podstavu zariadenia.

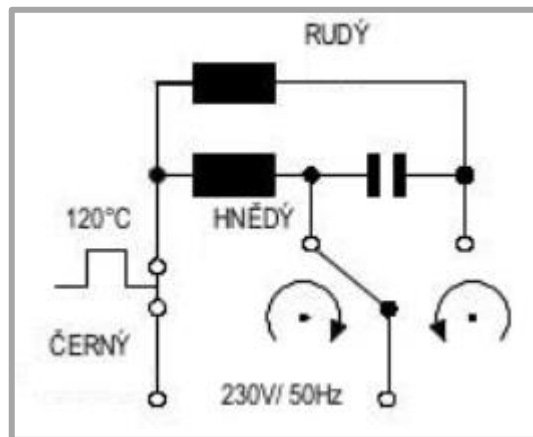
5.4 Vlastnosti použitého elektromotora

5.4

Ako pohon pre experimentálne zariadenie bol zvolený elektromotor s označením J22RX. Jedná sa o prírubový jednofázový asynchrónny motor s pomocnou fázou, ktorý má výkon 180 W a otáčky 2850 ot/min^{-1} na výstupe [16] s využitím napájania

zo siete 230 V. To umožňuje použitie zariadenia v priestoroch, kde nie je možný prístup k vyššiemu napätiu.

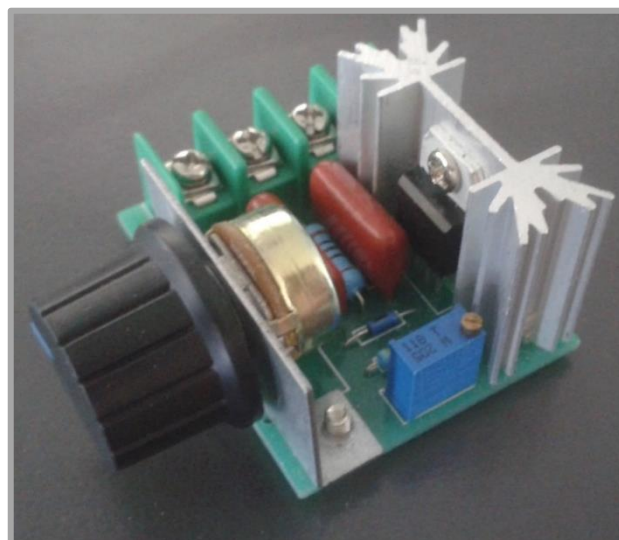
Vďaka zapojenému kondenzátoru (Obr. 5-5) je elektromotor schopný otáčania v pravom aj v ľavom zmysle rotácie. Do zapojenia elektromotora bola taktiež začlenená prepäťová poistka, ktorá zabráni prechodu väčšieho napätia do elektromotora. Zapojenie elektromotora je zakrytované konštrukčnou krabičkou GEWISS. Regulácia zmyslu otáčania je zaistená trojpolohovým spínačom.



Obr. 5-5 Schéma zapojenia elektromotora [16]

5.4.1 Regulácia otáčok

V konštrukčná časť práce sa zaoberala aj otázkou možnosti regulácie otáčok. Táto otázka sa riešila za pomoci regulátora otáčok (Obr. 5-6), ktorý je schopný regulovať otáčky na základe zmeny napätia potenciometrom. Jedná sa o zariadenie používané najčastejšie na reguláciu otáčok elektromotorov s nižšími výkonmi [15]. Z dôvodu



Obr. 5-6 Regulátor otáčok pre elektromotory menších výkonov

veľmi nízkych nákladov na tento produkt bolo zvážené jeho použitie pre reguláciu otáčok použitého elektromotora. Regulátor umožňuje regulovať napätie od 100%

účinnosti po 15% pri napätí 230 V a do výkonu až 20kW. Od tohto spôsobu sa však upustilo. Dôvodom bolo, že pri najnižšej priepustnosti napätia (15%) dochádzalo k zastavovaniu motora pôsobením trenia v ložiskách a taktiež nutnosť neustáleho monitorovania rýchlosti rotácie snímačom otáčok.

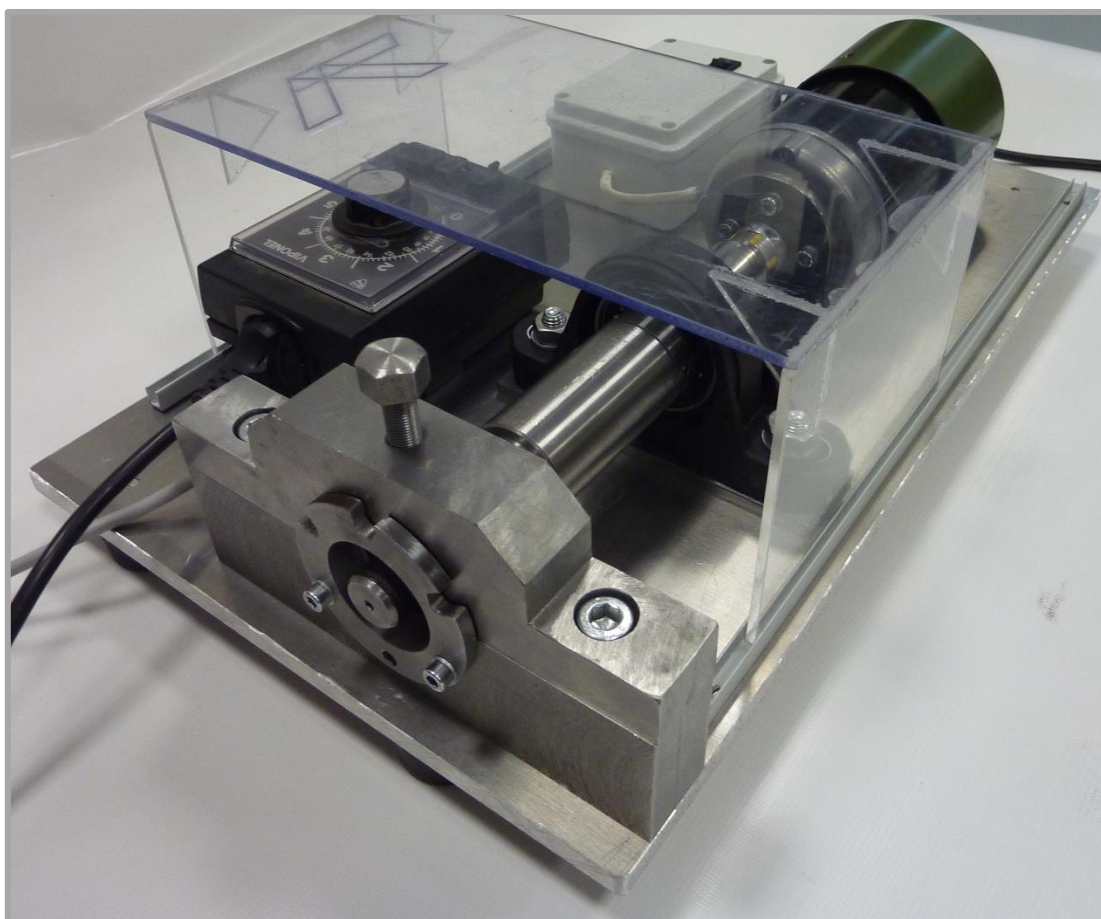
Ďalším spôsobom bola regulácia za pomoci frekvenčného meniča, ktorý by zaisťoval reguláciu otáčok prostredníctvom zmeny frekvencie. Bolo nutné použitie meniča, ktorý umožňuje zmenu frekvencie pre elektromotory s výkonom 0,18kW. Od tejto varianty sa však taktiež upustilo, z dôvodu vysokej ceny frekvenčného meniču, ktorá nie je priamo úmerná nutnosti manipulácie otáčok pri kalibračných testoch.

Výsledkom bolo, že sa od regulácie otáčok upustilo a experimentálna časť bola realizovaná pri konštantných otáčkach elektromotoru (2850 ot/min).

5.5 Zostavenie experimentálneho zariadenia

5.5

Pre relatívnu kalibráciu bolo zostavené experimentálne zariadenie, ktorého konštrukcia bola inšpirovaná podľa zariadenia na skúšky trvanlivosti poškodených ložísk [10]. Experimentálne zariadenie (Obr. 5-7, Obr. 5-8), okrem kalibračného telesa



Obr. 5-7 Zostavený prototyp experimentálneho zariadenia

a elektromotoru, obsahuje tiež nosný ložiskový domček, ktorý vycentroval hriadeľ, zaisťuje súosú polohu medzi kalibračným telesom (referenčným ložiskom) a elektromotorom. Jedná sa o nosný prvok, ktorý by v prípade zničeného referenčného

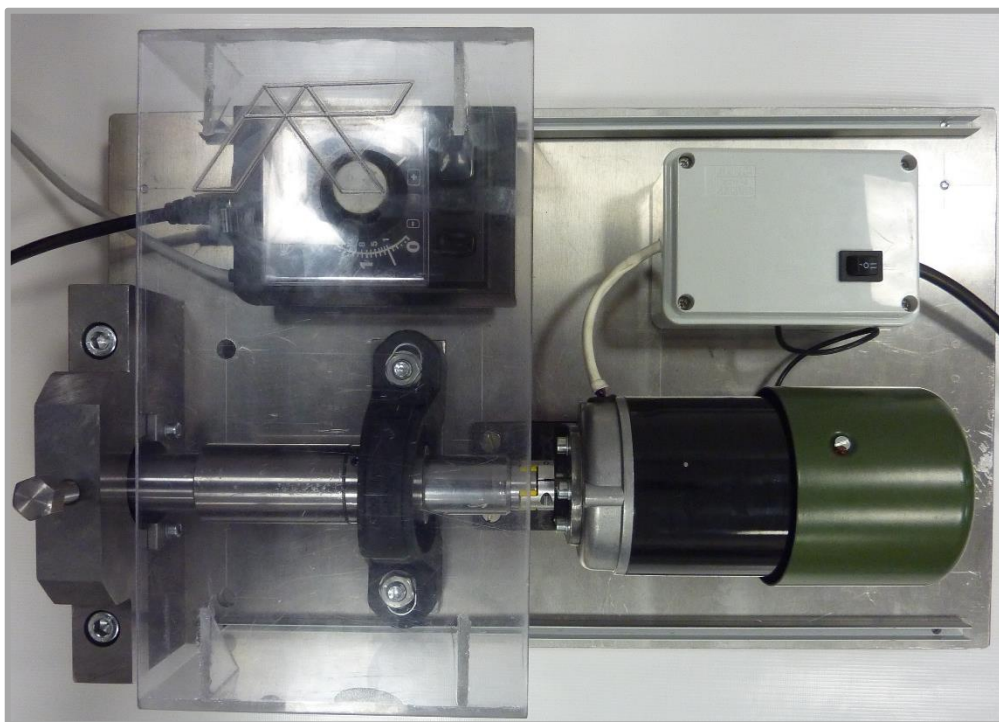
ložiska niesol hmotnosť hriadeľa. Pri experimentoch s prevádzky poškodeným ložiskom, kde sa toto ložisko použilo ako referenčné nastala havária a došlo k rozpadu ložiska z dôvodu veľkého rozsahu poškodenia. Ložiskový domček udržal hmotnosť hriadeľa a nenastalo tak poškodenie elektromotora.

Ložiskový domček bol opatrený kryptovaním priestoru s ložiskovými elementmi z dôvodu prítomnosti tuhého maziva. Toto mazivo pri experimentoch zapríčiňovalo veľmi rýchly nárast teploty hriadeľa. Aby sa zabránilo zvyšovaniu teploty hriadeľa, bolo nutné odstrániť tuhé mazivo, vrátanie kryptovania priestoru s ložiskovými elementmi, ktoré muselo byť pri odstraňovaní maziva mechanicky poškodené.

Spoj medzi hriadeľom a motorom zaisťuje pružná spojka EK7 [17], ktorá pohlcuje silné vibrácie, produkované elektromotorom. Je schopná aj minimálneho axiálneho vyosenia. Táto spojka má zo strany hriadeľa rozperný kužeľ, ktorý sa umiestňuje do vyvrtaného otvoru v hriadeľi. Následne sa začne dotahovať skrutka vedená v ose spojky, tým začne rozperný kužeľ rozťahovať rozpernú časť spojky až kým sa nevytvorí svorný spoj medzi hriadeľom a spojkou. Zo strany hriadeľa je spoj riešený nábojom a dotahovanou skrutkov. Tá pri dotiahnutí tvorí svorný spoj medzi hriadeľom a spojkou.

Elektromotor je prichytený k hliníkovej podstave pomocou príruby. Príruba je podložená gumovými podložkami, ktoré zabráňujú prenosu nežiadúcich vibrácií z elektromotora cez prírubu a hliníkovú podstavu.

Zariadenie je opatrené krytovaním. Jedná sa o lepený plexisklový kryt, ktorý slúži k zamedzení kontaktu obsluhy s rotujúcimi časťami zariadenia. Kryt bol umiestnený



Obr. 5-8 Prototyp experimentálneho zariadenia

Kalibračné experimenty boli realizované v krátkych časových intervaloch a vzorkovacia frekvencia bola nastavená na 2 MHz. Pre možnosť jednoduchšieho spracovania signálu je vhodné mať presný časový úsek merania. Pre túto aplikáciu bol

použitý časovač, ktorý pri dosiahnutí nastaveného času zastavil prívod napätia do elektromotora. Časovač je na zariadení umiestnený voľne

V poslednej rade bolo experimentálne zariadenie opatrené gumový dorazmi umiestnenými na spodnej strane hliníkovej podstavy. Účelom je tlmiť prenos vibrácií do predmetu, na ktorom je zariadenie umiestnené.

Toto prenosné experimentálne zariadenie je naplno funkčné a schopné prevádzky.

5.6 Experimentálna časť

5.6

Táto časť diplomovej práce popisuje postup meraní a experimentov, ktoré bolo nutné realizovať pre vznik charakteristík citlivosti vybraných snímačov typu MDK-13 a nasledovného návrhu metódy kalibrácie.

5.7 Metodika hodnotenia snímačov AE

5.7

V kapitole 4.5, ktorej obsah je venovaný metodike hodnotenia, je poukázané na vyhodnocovanie AE snímačov pri relatívnej kalibrácii. Keďže relatívna kalibrácia je zameraná na porovnávanie jednotlivých snímačov medzi sebou alebo porovnávanie referenčného snímača so snímačom kalibrovaným je nevyhnutne nutné stanoviť určitý postup vyhodnocovania a spracovania nameraných dát.

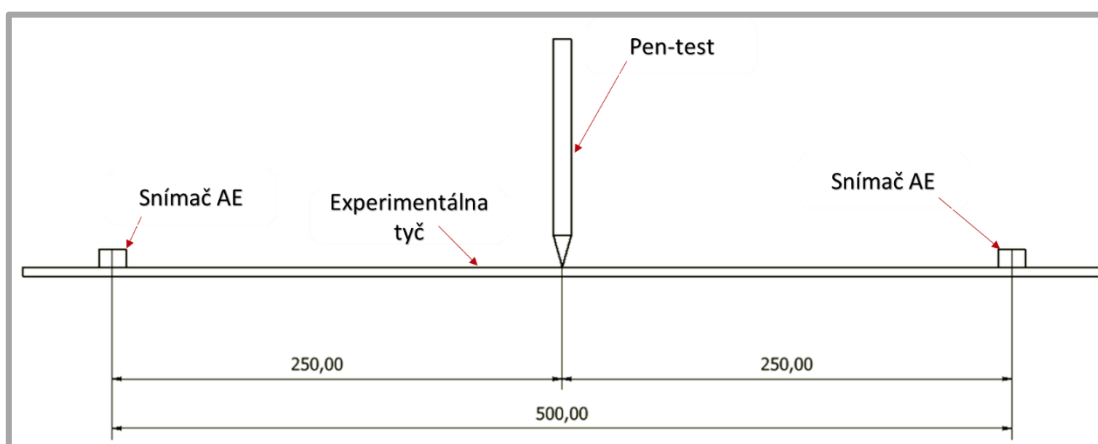
Boli vybrané 4 snímače rovnakého typu každé s inou dĺžkou prevádzky. V dôsledku rôznej doby prevádzky má každý snímač rozdielnú odozvu signálu na generovanú AE.

5.7.1 Voľba referenčného snímača Pentestom

5.7.1

Prvým krokom bolo overenie citlivosti normalizovaným spôsobom a na základe experimentu predbežne stanoviť referenčný snímač.

Pri experimente bola použitá plochá tyč 50x5-600 (Obr.5-9), na ktorú sa vo vzdialenosti 250 mm od zdroja AE (Pentest) umiestnili snímače AE. Po sérii pentestov sa namerané hodnoty vyhodnocovali. Kľúčovým parametrom pritom bola maximálna

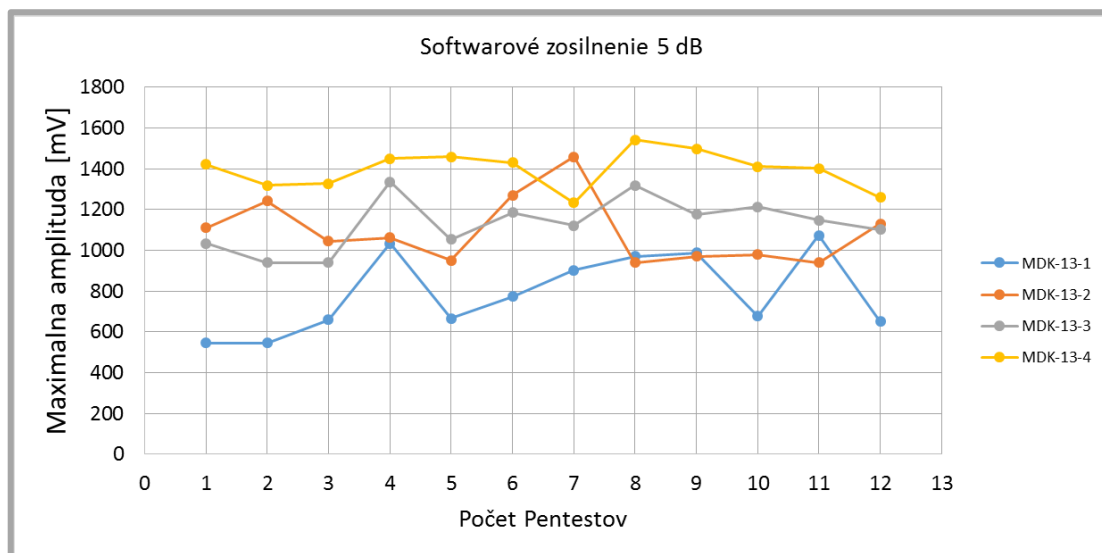


Obr. 5-9 Schéma experimentu s pentestom

amplitúda (mV) odozvy signálu na burst a risetime (čas, za ktorý hit AE dosiahne maximálnej hodnoty), uvádzaný v μs .

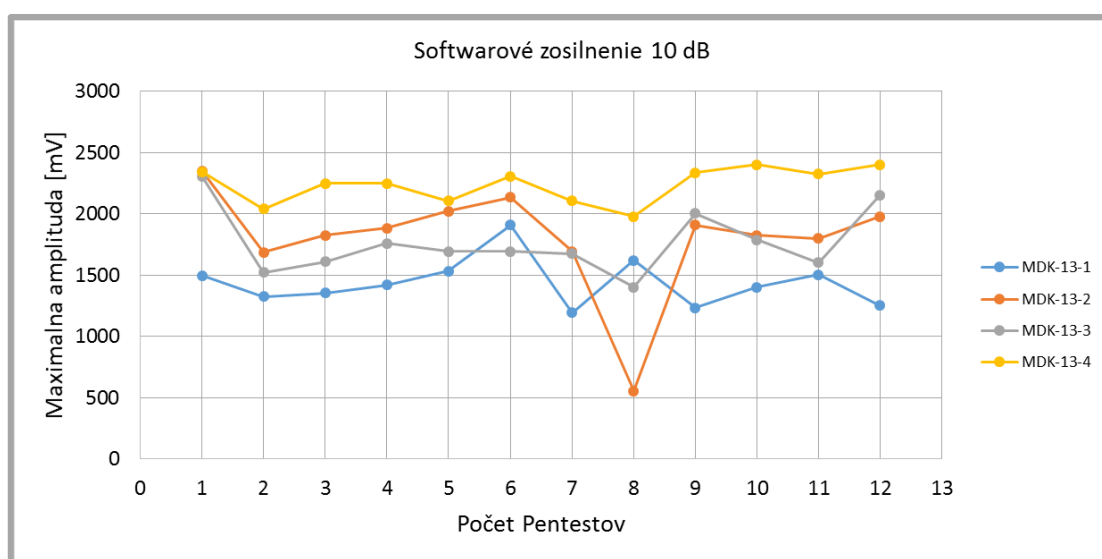
Experiment bol zameraný na softwarové zosilnenia, pri ktorých je zreteľná odlišnosť sledovaných hodnôt.

Na obr. 5-10 je zobrazený graf priebehu merania pri softwarovom zosilnení 5 dB. Pri tomto zosilnení snímač s označením MDK-13-4 dosahoval u väčšiny pen-testov najväčšej citlivosti kde najvyššia hodnota max. amplitúdy dosahuje 1543 mV a najnižšia 1260 mV. Podľa výsledkov pentestov ďalej konštatujeme, že snímače MDK-13-2 a MDK-13-3 majú podobnú citlivosť. U MDK-13-2 sa hodnoty pohybujú v rozmedzí 941-1459 mV. Hodnoty u snímača MDK-13-3 boli namerané v rozsahu 941-1318 mV. Najnižších hodnôt dosahuje snímač MDK-13-1 v rozsahu 545-1073 mV.



Obr. 5-10 Maximálne amplitúdy pre zosilnenie 5 dB (Pentest)

Obr. 5-11 zobrazuje výsledky pentestov dosiahnuté pri softwarovom zosilnení 10 dB. Z výsledkov vyplýva, že snímač MDK-13-4, pri určitých pentestoch dosahuje maximálnej hranice amplitúdy analyzátoru, a to 2 400 mV. U snímača MDK-13-1 je pozorovaná radovo nižšia hodnota max. amplitúdy pri porovnaní s hodnotami snímača



Obr. 5-11 Maximálne amplitúdy pre zosilnenie 10 dB (pentest)

MDK-13-4. U niektorých pentestov je rozdiel až 1000 mV. Snímač MDK-13-2 pri

tomto zosilnení javí lepšiu citlivosť ako snímač MDK-13-3. Pri zrovnaní „neuletených“ hodnôt činí rozdiel amplitúd 150-400 mV.

Na základe tohto experimentu usudzujeme, že snímač s označením MDK-13-4 má pre nespojitú udalosť AE z vybraných snímačov najvyššiu citlivosť.

Je však nutné na základe experimentu poznamenať, že pentest je nespoľahlivou metódou pri určovaní citlivosti snímačov. Existuje vysoká pravdepodobnosť, že meranie bude ovplyvnené chybou ľudského faktoru. Ten môže ovplyvniť uhol lomu, dĺžku lomeného grafitu atď. Pentest je vhodné využívať najmä pri lokalizácii defektov, nie je však vhodný pre kalibráciu snímačov.

5.8 Vyhodnotenie výsledkov testovania kalibračnej metódy s väzbovým médiom

5.8

Táto kapitola pojednáva o výsledkoch z kalibračných testov realizovaných na zostavenom experimentálnom zariadení. Jednalo sa o experimenty, pri ktorých bola monitorovaná hodnota RMS signálu. Pozoroval sa aj vplyv zmyslu rotácie a dĺžky merania. Výsledky však primárne vychádzajú z 2 minútových meraní pri pravom zmysle otáčania.

Použité ložiská umožnili zmenu RMS na základe druhu ich defektu. Najväčší defekt bol predpokladaný u ložiska s poškodenou kľetkou, avšak pri experimentoch sa zistilo, že najvyšších hodnôt RMS dosahuje ložisko s poškodeným vnútorným krúžkom. Tabuľka 1 zobrazuje skratky jednotlivých ložísk použitých pri meraní.

Tab. 1 Skratky popisov ložísk

Poškodenie ložiska	Anglický názov	Skratka
Nepoškodené ložisko	Non-damage bearing	NB
Poškodená kľetka	Damage cage	DC
Poškodený vonkajší krúžok	Damage of outer circuit	DOC
Poškodený vnútorný krúžok	Damage of inner circuit	DIC

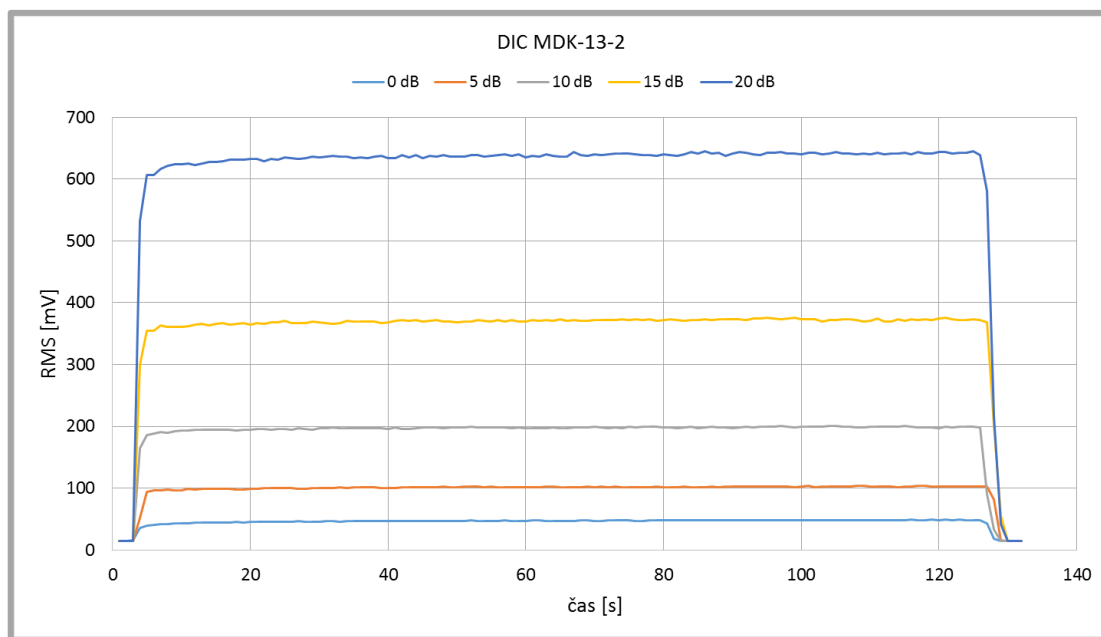
Merania sa realizovali dvojím spôsobom. Prvý spôsob bol, že sa umiestnili na kalibračné teleso vždy dva snímače a po zaznamenaní výsledkov a dokončení experimentu s daným ložiskom sa obidva snímače zamenili za ďalšie. Druhým spôsobom bolo, že referenčný snímač bol trvalo umiestnený na kalibračnom telese a kalibrované snímače sa menili.

Merania boli realizované v 2 a 5 minútových intervaloch, vždy pre dané zosilnenie. Pri každom zosilnení sa odpočítal čas 2 a 5 minút. Pre presné meranie času sa používal časovač, ktorý zaručil rovnaký počet nameraných dát a po odpočte času zastavil experiment. Následne boli namerané hodnoty spracované.

5.8.1 Spôsob spracovania signálu

5.8.1

Obr. 8-11 zobrazuje príklad nameraných dát. Jedná sa o priebeh 2 minútových experimentov pre snímač s označením MDK-13-2. Ako referenčné ložisko bolo použité ložisko s poškodeným vnútorným krúžkom. Je možné pozorovať zmenu zosilnenia 0-20 dB. Obr. 5-12 obsahuje taktiež zobrazený začiatok a koniec merania s nulovou hladinou (hladina šumu) a hodnoty nábehu na určitú hodnotu RMS signálu.



Obr. 5-12 Príklad grafu nameraných hodnôt v časovom spektre

Z týchto dát sa ďalej realizoval výber intervalu v rozsahu 110s, aby sa eliminovali hodnoty RMS pri rozbehu a dobehu ložiska, ktoré sa líšia v závislosti od zosilnenia.

5.8.2 Nulová hladina komunikačných kanálov (Vplyv hladiny šumu)

Ako bolo spomenuté v kapitole 4.5.1 nulová hladina (hladina šumu) je závislá na komunikačnom kanály, ktorého hodnota sa v závislosti na čase mení vplyvom degradácie. Analyzátor AE Dakel Xedo používaný v tejto práci vykazuje na každom kanále odlišné hodnoty hladiny šumu. Preto bol do vyhodnocovacieho postupu včlenený aj odpočet hladiny šumu jednotlivých kanálov. Hladina šumu je ovplyvnená dĺžkou káblov snímačov, ktorá je rozdielna. Dĺžka však ovplyvňuje hladinu šumu minimálne (2-3 mV)

Pri profesionálnych kalibráciách sa bude používať analytické zariadenie, ktoré bude obsahovať komunikačné kanály s rovnakou nulovou hladinou.

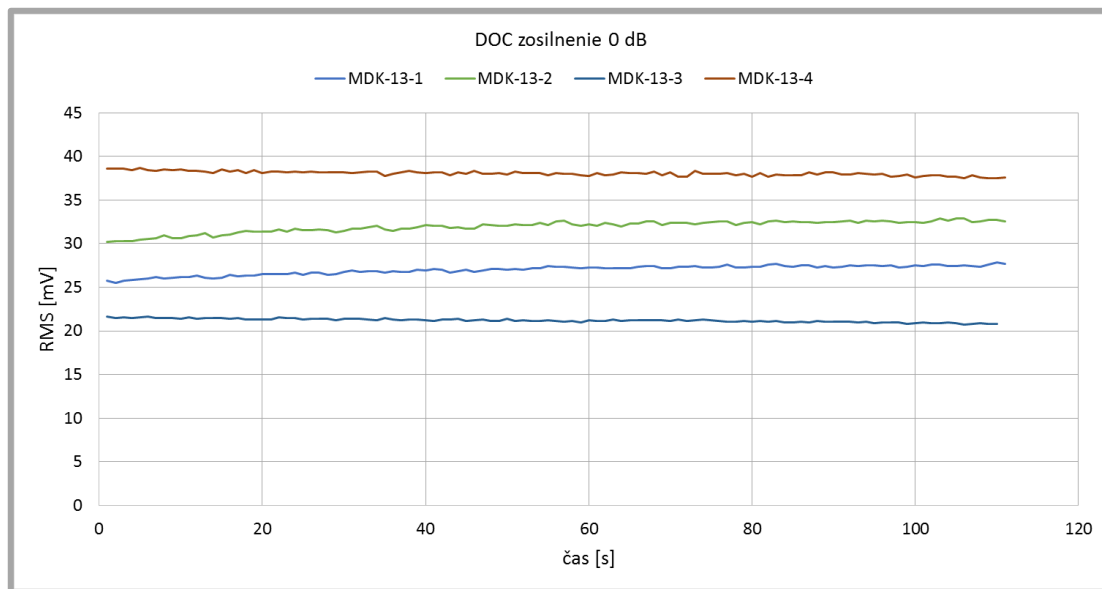
Tab. 2 Počiatočná hladina komunikačných kanálov použitého analyzátoru Dakel Xedo

Číslo kanálu	RMS nulovej hladiny [mV]	Tolerancia [mV]
1.	14,2	± 0,5
2.	32,4	± 0,7
3.	27,7	± 0,7
4.	54,2	± 1

5.8.3 Experimenty so softwarovým zosilnením 0 dB

Pretože snímače typu MDK-13 majú interný predzosilňovač signálu, ktorý poskytuje zosilnenie cca 35 dB, bolo pozorovaná odozva signálu pri nulovom zosilnení. Na obr. 5-13 je zobrazený priebeh experimentu s poškodením vonkajšieho krúžku pri zosilnení 0 dB za jednotku času 2 minút a pravom zmysle otáčania.

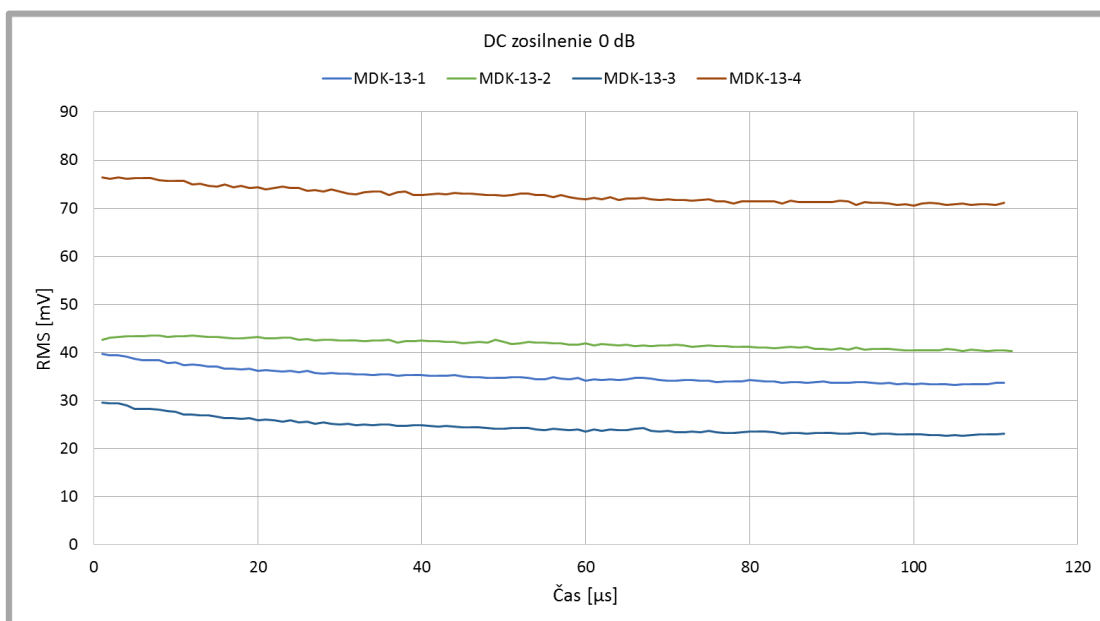
Z výsledkov je možné posudzovať chovanie snímačov, z ktorých sa ako najcitlivejší javí snímač MDK-13-4,. Ten pri tomto poškodení dosahuje priemernú hodnotu RMS 38 mV a snímač MDK-13-3 zase ako najmenej citlivý a hodnotou RMS 21 mV. Avšak



Obr. 5-13 Hodnoty RMS v závislosti na čase pri meraní s 0 dB zosilnením a ložiskom s poškodeným vonkajším krúžkom

rozdiel RMS všetkých snímačov je v intervale 20-40 mV, čo sa považuje za nízky rozdiel odozvy signálu.

Na obr. 5-14 je priebeh merania s použitím ložiska s poškodenou kľetkou ako zdroju AE pri nulovom zosilnení. Boli zaznamenané vyššie hodnoty RMS na základe rozsahu poškodenia.



Obr. 8-14 Hodnoty RMS v závislosti na čase pri meraní s 0 dB zosilnení a ložiskom s poškodenou kľetkou

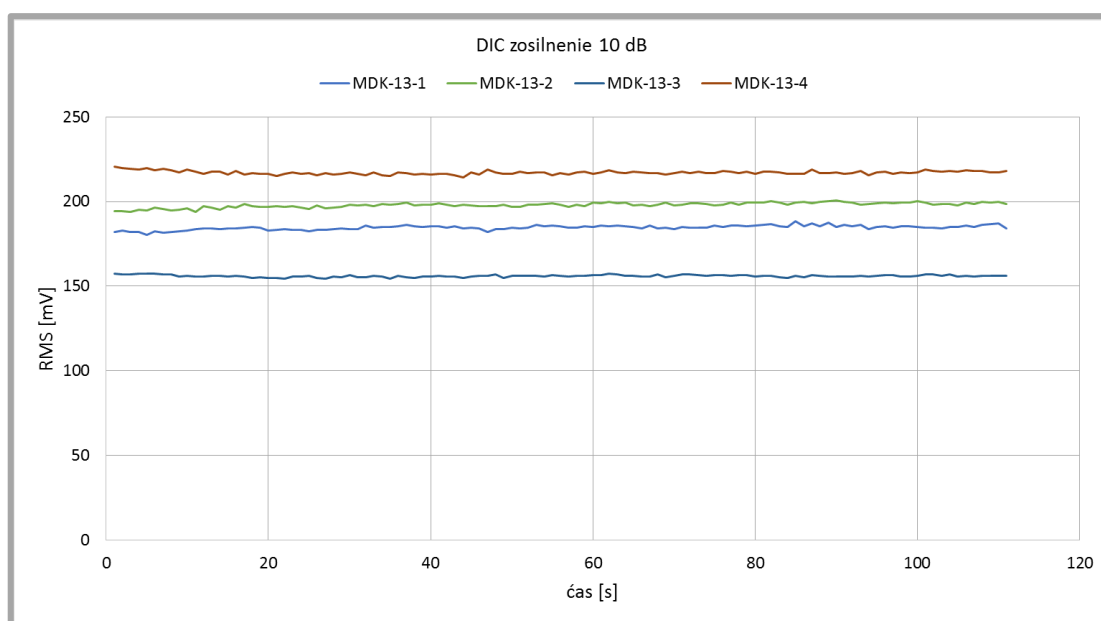
Veľký nárast RMS nastal hlavne u MDK-13-4. Tento snímač má už pri nulovom zosilnení veľkú odozvu signálu. Hodnota RMS u tohto snímača vzrástla o 91%. Dôvodom je nulová časová degradácia snímača. Snímače MDK-13-1, MDK-13-2 a MDK-13-3 vykazujú zvýšenú odozvu na poškodenie ložiska ako pri meraní s ložiskom s poškodeným vonkajším krúžkom. Priemer hodnôt RMS MDK-13-2 dosahuje 42 mV a MDK-13-1 zaznamenal nárast na hodnotu 35 mV. Priemer zaznamenananej RMS MDK-13-3 dosahuje nárast na hodnotu 27 mV.

Tab. 3 Priemery sledovaných hodnôt RMS pri 0 zosilnení

Snímač	RMS [mV] DOC	RMS [mV] DC
MDK-13-1	27	36
MDK-13-2	32	42
MDK-13-3	21	26
MDK-13-4	38	73

5.8.4 Experimenty pri softwarovom zosilnení 10 dB

Obr. 5-15 zobrazuje výsledky experimentu s ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom pri softwarovom zosilnení 10 dB. Bol zaznamenaný výraznejší vzostup hodnôt RMS u všetkých snímačov, kde hodnoty snímača MDK-13-2 snímača



Obr. 5-15 Hodnoty RMS v závislosti na čase pri meraní s 10 dB zosilnením a ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom

dosahujú 197 mV. Snímač dosiahol vyššej hodnoty oproti nulovému zosilneniu o 360 %. A hodnoty RMS MDK-13-4 dosahujú zvýšenia o 320 %. Avšak RMS u MDK-13-1 dosahuje zisku 413 % pri porovnaní s nulovým zosilnením a MDK-13-3 dosahuje hodnôt v priemere 156 mV čo je nárast o 420 %. Pri tomto meraní bolo zistené, že snímače s dlhším degradačným časom dosahujú pri tomto zosilnení vyššie zisky hodnôt RMS.

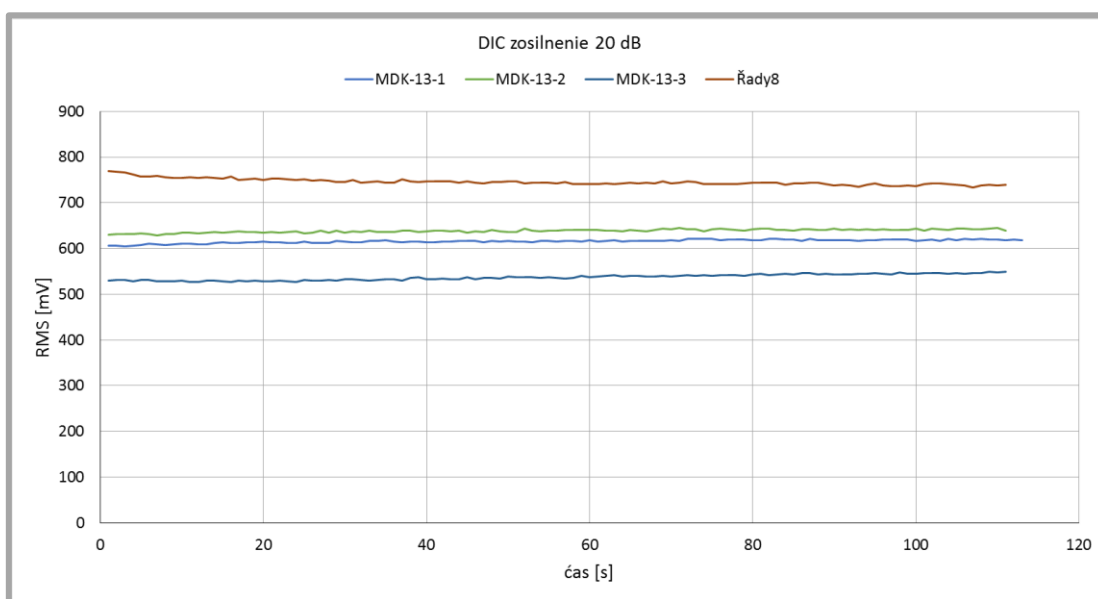
Tab. 4 Priemery sledovaných hodnôt RMS pri ložisku DIC a 10dB zosilnení

Snímač	RMS [mV] DIC
MDK-13-1	185
MDK-13-2	198
MDK-13-3	156
MDK-13-4	217

5.8.5 Experimenty pri softwarovom zosilnení 20 dB

5.8.5

Jedná sa o maximálne zosilnenie, ktorým sa zaoberala táto práca. Pri tomto zosilnení dochádza s vysokému nárastu prijatej energie a citlivosť snímačov dosahuje vysokých



Obr. 5-16 Hodnoty RMS v závislosti na čase pri meraní s 20 dB zosilnení a ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom

hodnôt. Obr. 5-16 popisuje hodnoty 20 dB s poškodeným vnútorným krúžkom. Snímače MDK-13-2 a MDK-13-1 dosahujú RMS v hodnote cez 600 mV a MDK-13-4 prekračuje pri tomto meraní 700 mV. Rozdiel medzi snímačmi pri tomto zosilnení dosahuje hodnôt v intervale 110-210 mV. Pri tomto zosilnení je jav degradácie snímačov AE najzreteľnejší z dôvodu vysokého ovplyvnenia citlivosti.

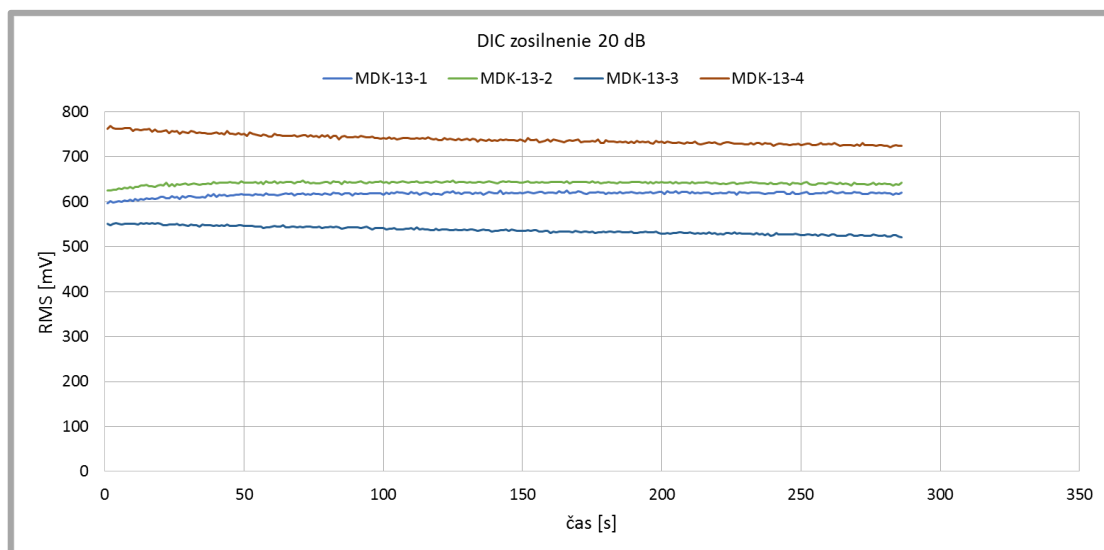
Tab. 5 Priemery sledovaných hodnôt RMS pri ložisku DIC s 20dB zosilnením

Snímač	RMS [mV]
MDK-13-1	617
MDK-13-2	639
MDK-13-3	537
MDK-13-4	749

5.8.6 Experimenty dlhších kalibračných časov

5.8.6

Ďalej boli uskutočnené 5 minútové merania s pravým zmyslom otáčania, ktoré mali zistiť chovanie snímačov pre prípad dlhších kalibračných časov. Experimentom bolo zistené, že pri dlhších kalibračných časoch nastáva väčší pokles hodnoty RMS. To



Obr. 5-17 Hodnoty sledovanej veličiny pri 5 minútovom meraní s 20 dB zosilnením a ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom

môže byť zapríčinené nízkym prítlakom snímačov a zvyšujúcou sa teplotou ložiska. Tento efekt je pre kalibráciu nežiadúci. Tento jav je možné pozorovať na obr. 5-17, kde sú MDK-13-3 a MDK-13-4 týmto javom ovplyvnené. Chovanie snímačov MDK-13-1 a MDK-13-2 je možné považovať za ideálne. Dosahované hodnoty RMS sú obdobné ako u identického 2 minútového merania. Pri tomto experimente, bol vybraný interval v rozsahu 285 sekúnd pre odstránenie hodnôt pri rozbehu a dobehu elektromotoru.

Tab. 6 Priemery RMS signálu DIC, zosilnenie 20 dB, 5 minútový test

Snímač	RMS [mV]
MDK-13-1	617
MDK-13-2	641
MDK-13-3	537
MDK-13-4	739

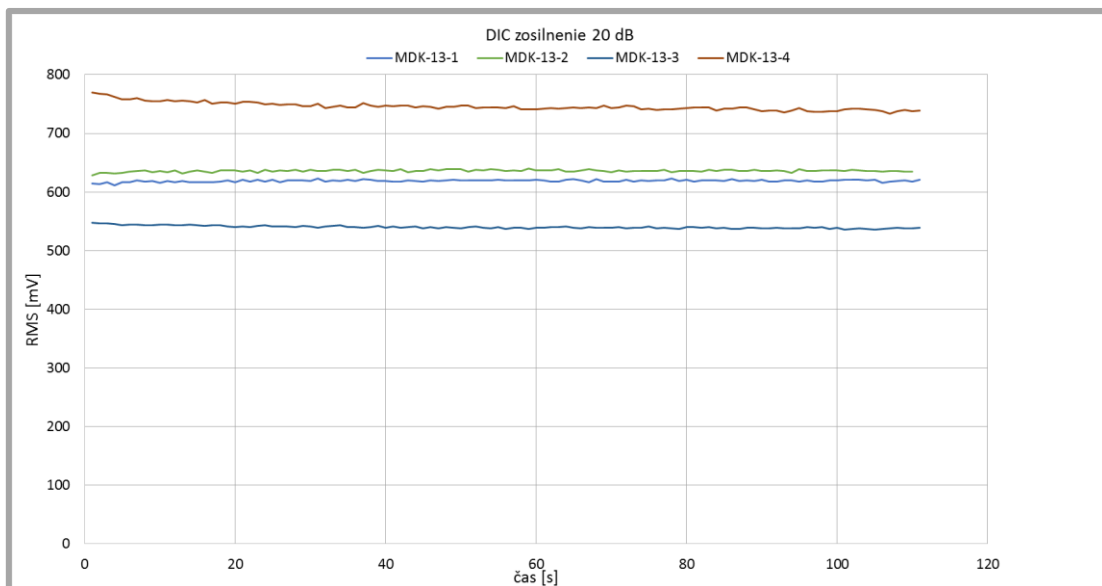
5.8.7 Vplyv zmyslu rotácie

Ďalším typom testov bolo overenie vplyvu smeru rotácie na RMS. Experimenty boli realizované za rovnakých podmienok ako 2 minútové merania s tým, že zmysel otáčania ložiska bol ľavotočivý smer. Cieľom experimentu bolo pozorovať zmenu RMS pri ľavom zmysle otáčania ložiska. Obr. 5-18 zobrazuje hodnoty RMS odozvy signálu pri 20 dB a DIC.

Tab. 7 Priemery RMS signálu DIC, zosilnenie 20 dB, ľavý zmysel otáčania

Snímač	RMS [mV]
MDK-13-1	619
MDK-13-2	636
MDK-13-3	540
MDK-13-4	746

Hodnoty RMS sú zmyslom otáčania ložiska ovplyvnené. Snímače umiestňované na ľavú stranu kalibračného telesa vykazovali zisk 3-4 mV hodnoty RMS, zatiaľ čo snímače umiestnené na pravej strane, dosahovali hodnôt RMS nižších ako pri pravom



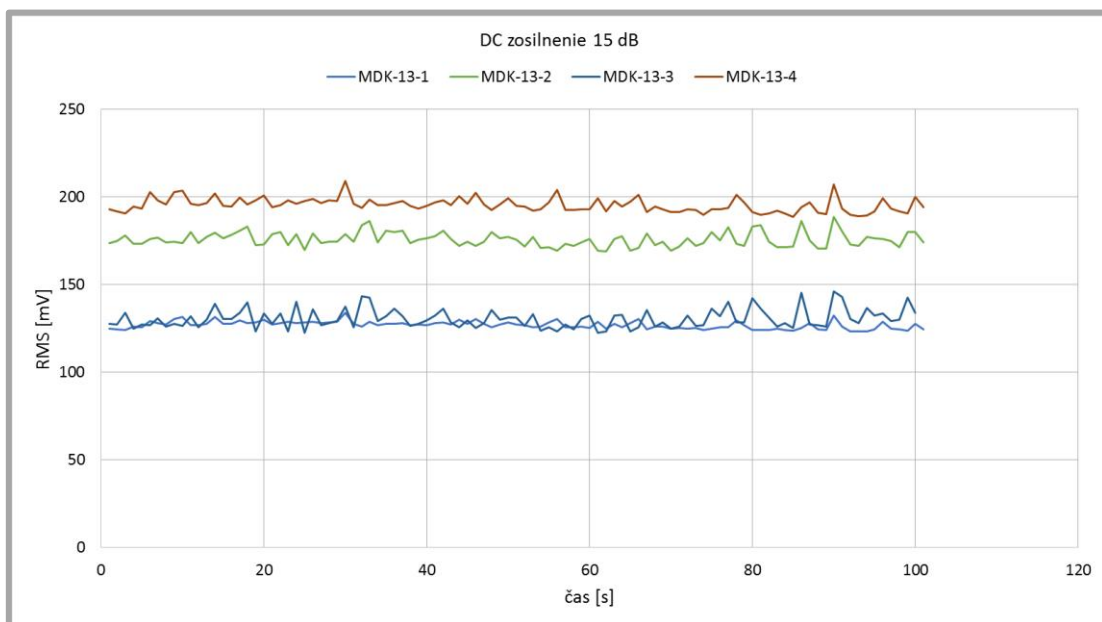
Obr. 5-18 Hodnoty sledovanej veličiny pri meraní v ľavom zmysle otáčania s 20 dB zosilnením a ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom

zmysle otáčania o 5-7 mV. Smer rotácie teda ovplyvňuje hodnoty RMS spojitého signálu AE na experimentálnom zariadení.

5.9 Výsledky z kalibračných testov bez väzbového média

5.9

Tieto merania boli zamerané na možnosť kalibrácie bez väzbového média. Cieľom bolo určiť možnosť kalibrácie, pri ktorej by meranie nebolo ovplyvnené negatívnym



Obr. 5-19 Hodnoty sledovanej veličiny RMS pri meraní bez väzbového média s 20 dB zosilnením a ložiskom s poškodenou kľetkou

vplyvom nesprávneho nanosenia väzbového média do kontaktu snímač-kalibračné teleso. Jednalo sa o merania v rozsahu 2 minút, ktoré mali overiť metódu kalibrovania „na sucho“. Priľnavosť k povrchu experimentálneho zariadenia bola zabezpečená len magnetmi snímačov.

Obr. 5-19 zobrazuje chovanie snímačov pri 15 dB ložiska s poškodenou klietkou. Bez použitia väzbového média sú hodnoty RMS veľmi nestále a nie je zaručená stabilita meraných dát. S výnimkou snímača MDK-13-1 majú RMS väčší rozptyl hodnôt. To je zapríčinené nedostatočnou priľnavosťou snímačov k povrchu kalibračného telesa. Taktiež v dôsledku nulovej adhézie k povrchu dochádzalo k zníženiu hodnôt RMS, ktoré vykazovali stratu.

U snímača MDK-13-1 činila strata 110 mV, MDK-13-3 90 mV, u snímača MDK-13-2 strata dosahovala 150 mV a u MDK-13-4 bola strata cez 200 mV. Z týchto meraní je zrejmé, že negatívny vplyv nedostatočnej adhézie má väčší dopad na citlivejšie snímače. Dôležitým javom v tomto prípade meria ja taktiež efektivita magnetu. Ten postup degradujú, čo sa negatívne prejavuje na výsledkoch merania.

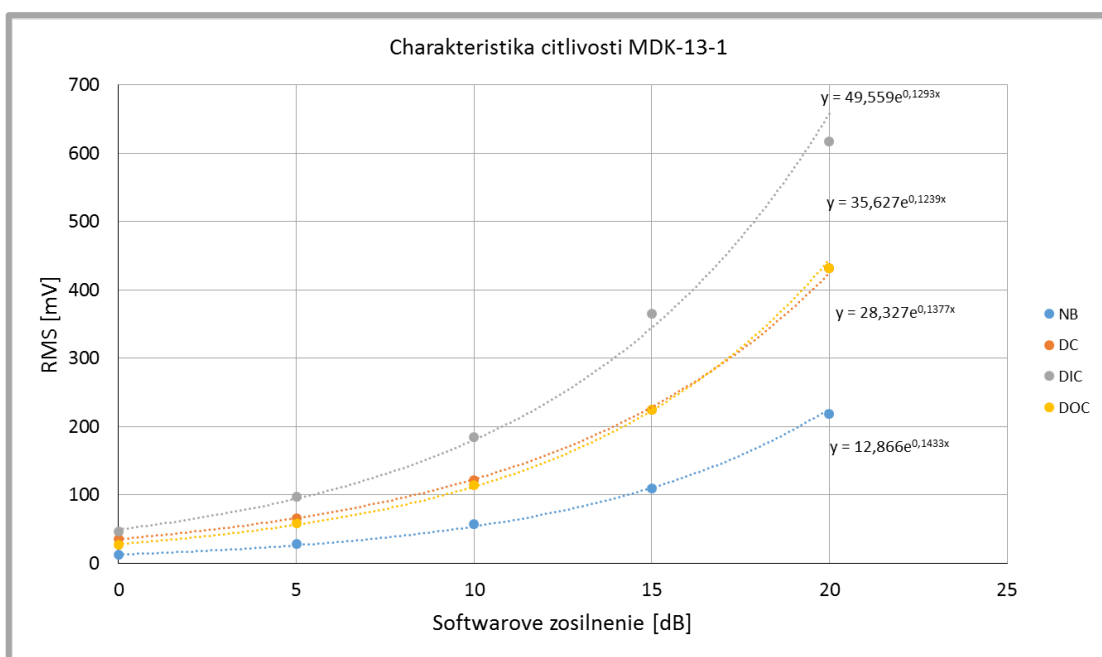
Vyvodенý záver z tohto merania je, že kalibrácia „na sucho“ nie je za daných podmienok vhodná.

5.10 Charakteristiky snímačov AE MDK-13

Na základe predošlých meraní boli zostavené charakteristiky citlivosti snímačov AE, ktoré stanovujú citlivosť. Charakteristika zobrazuje závislosť citlivosti snímača, ktorá je vyjadrená hodnotou RMS, a softwarového zosilnenia. Charakteristika stanovuje citlivosť snímača pre každý typ experimentálne poškodeného ložiska.

5.10.1 Charakteristika citlivosti snímača MDK-13-1

Na obr. 5-20 sú zobrazené charakteristiky snímača MDK-13-1 pre všetky typy ložísk. Vynesené body jednotlivých ložísk sú preložené spojnicou trendu. V prípade všetkých snímačov dochádza k exponenciálnej závislosti medzi RMS a zosilnením. Odozva



Obr. 5-20 Charakteristika citlivosti v závislosti na type poškodenia snímača MDK-13-1

tohto snímača na poškodenú klieťku a poškodený vonkajší krúžok dosahuje podobných hodnôt. Takmer rovnakú odozvu signálu je možné pozorovať u zosilnenia

Tab. 8 Aritmetické priemery RMS snímača MDK-13-1

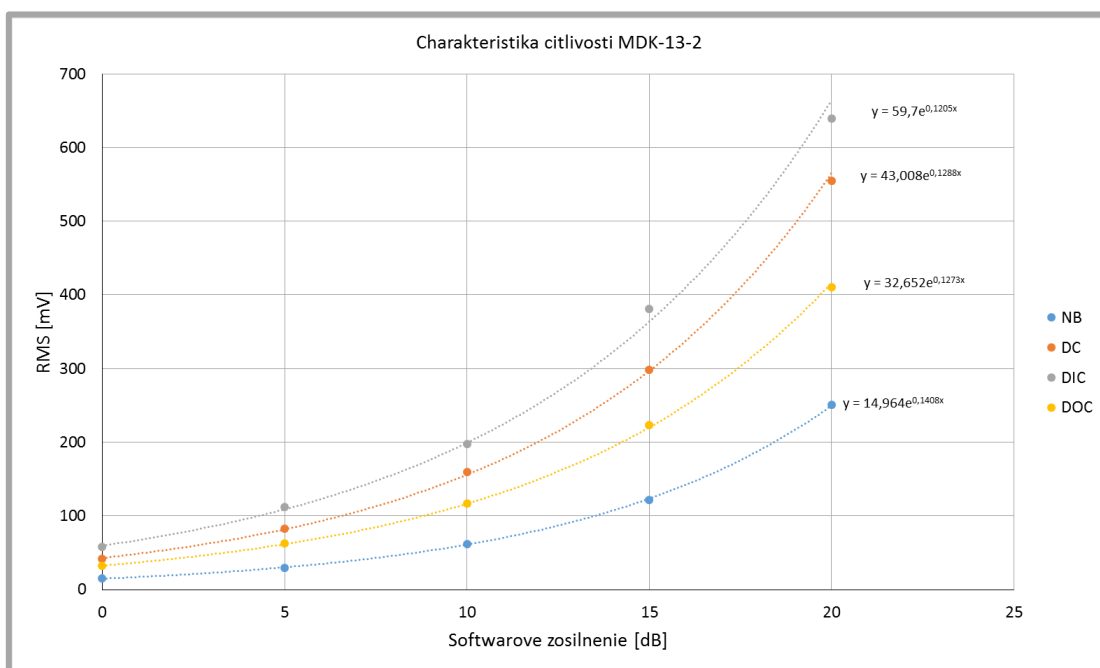
Poškodenie	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
NB	12	28	57	109	219
DC	36	66	122	224	416
DOC	27	59	115	225	432
DIC	47	98	192	365	653

15 dB. Ložisko s poškodením vnútorného krúžku dosahuje u tohto snímača pri zosilnení 20 dB 652,5 mV.

5.10.2 Charakteristika citlivosti snímača MDK-13-2

5.10.2

MDK-13-2 ma vyššiu citlivosť oproti MDK-13-1. Citlivosť je zaznamenaná na obr. 5-21, z ktorého je zrejmé že snímač dosahuje väčšej citlivosti ako MDK-13-1. Dôkazom



Obr. 5-21 Charakteristika citlivosti v závislosti na type poškodenia snímača MDK-13-2

je, že pri DIC a zosilnení 5 dB presahuje hodnotu 100 mV. Takisto pri DIC a 10 dB hodnota RMS dosahuje skoro 200 mV. Hodnoty získané experimentmi pre tento snímač dosahujú hodnôt, ktoré ho klasifikujú ako druhý najcitlivejší.

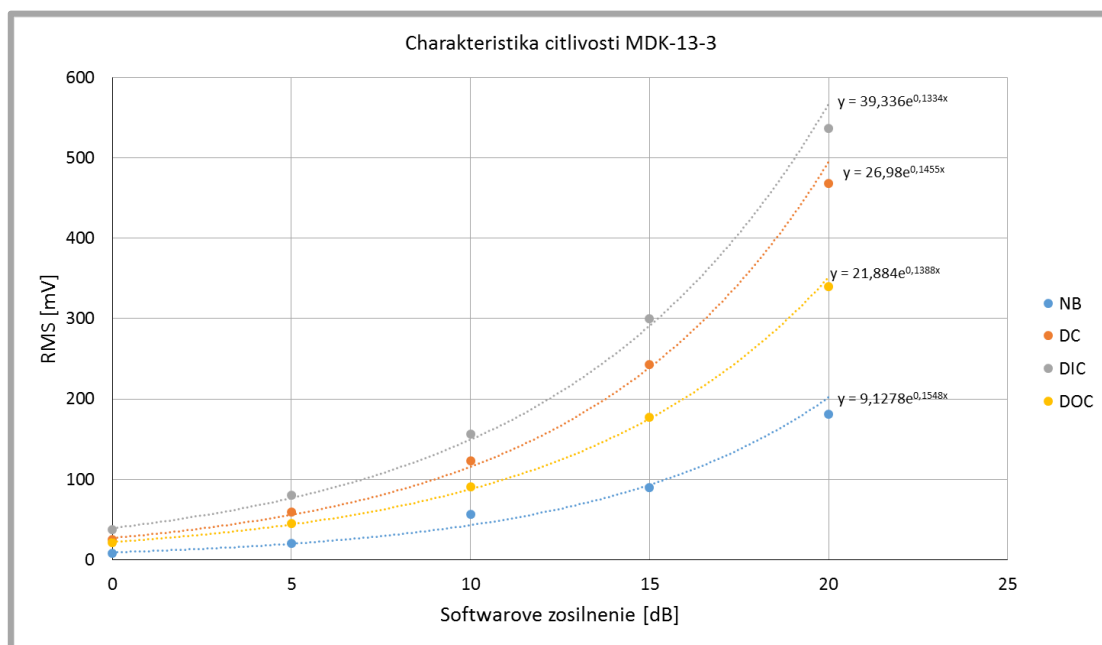
Tab. 9 Aritmetické priemery RMS snímača MDK-13-2

Poškodenie	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
NB	15	30	62	122	251
DC	42	83	160	298	555
DOC	32	63	117	223	410
DIC	58	112	208	381	663

5.10.3 Charakteristika citlivosti snímača MDK-13-3

Na obr. 5-22 sú zobrazené hodnoty senzoru s označením MDK-13-3. Výsledky RMS dosiahnuté týmto snímačom zodpovedajú tomu, aby bol klasifikovaný ako najmenej citlivý. Ako príčina bola stanovená najdlhšia prevádzková doba snímača, pri ktorej došlo k väčšej degradácii komponentov. Avšak tento snímač stále vykazuje vysokú citlivosť pri vyšších zosilneniach čo je možné posúdiť z tabuľky 4. Pri softwarových zosilneniach 15 dB a vyšších dosahuje stále prijateľných výsledkov.

Poškodenie	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
NB	8	20	56	90	181
DC	26	59	123	243	468
DOC	21	45	91	177	340
DIC	37	80	157	300	538



Obr. 5-22 Charakteristika citlivosti v závislosti na type poškodenia snímača MDK-13-3

5.10.4 Charakteristika citlivosti snímača MDK-13-4

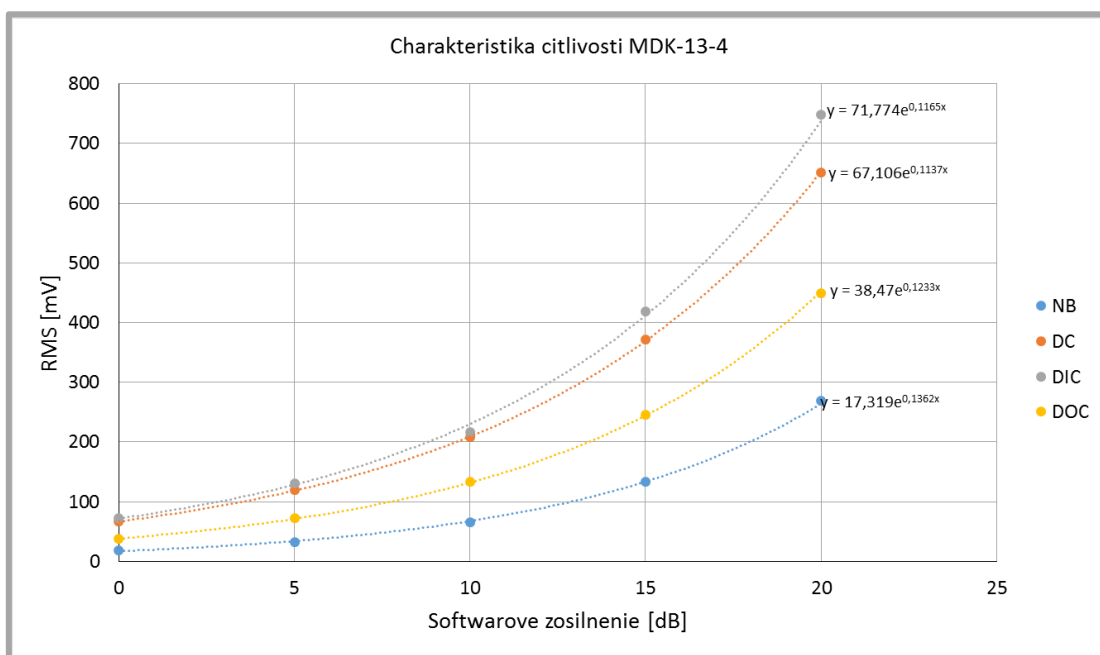
Jedná sa o nový snímač, ktorého prevádzková doba je prakticky nulová. Hodnoty citlivosti tohto snímača dosahujú jednoznačne najvyšších hodnôt RMS v celej škále experimentov od zosilnení 0-20 dB pri všetkých druhoch poškodenia ložísk (Obr.5-23).

Tab. 11 Aritmetické priemery RMS snímača MDK-13-4

Poškodenie	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
NB	18	33	66	134	269
DC	67	119	208	372	651
DOC	38	72	133	245	449
DIC	73	130	217	419	749

Už pri 10 dB zosilnení a použití ložiska s poškodenou kľetkou (druhé najvýznamnejšie poškodenie) dosahuje snímač hodnoty RMS ako jediný cez 200 mV. Rozdiel však nie je vysoký pri porovnaní s MDK-13-2.

Na základe nameraných dát a nasledovného spracovania signálu sa tento snímač klasifikuje ako najcitlivejší. V tabuľke 11 sú zobrazené aritmetické priemery RMS signálu jednotlivých experimentov pre všetky typy experimentálnych ložísk.



Obr. 5-23 Charakteristika citlivosti v závislosti na type poškodenia snímača MDK-13-4

5.11 Návrh metódy kalibrácie

5.11

Hodnota efektivity kalibrovaného snímača je určená na základe priamej úmernosti k referenčnému snímaču, kde efektivita referenčného snímača je 100% a efektivita kalibrovaného snímača sa dopočítava. Zvolí sa referenčné ložisko, ktoré sa použije ako zdroj AE. Následne je experimentálne získaná charakteristika kalibrovaného snímača.

Pokiaľ je zaručené, že pri experimente nepríde ku zmene experimentálnych podmienok, nie je nutné znovu vyhodnocovať charakteristiku referenčného snímača, ale je vhodnejšie použiť charakteristiku získanú v predchádzajúcich kalibráciách. Na základe priamej úmernosti týchto parametrov sme schopný určiť efektivitu kalibrovaného snímača podľa relatívnej kalibrácie.

Keďže sú charakteristiky snímačov exponenciálneho typu, je nutné počítať efektivitu snímača v kľúčových bodoch zosilnenia (0,5,10,15,20 dB) a z tohto sme schopný určiť hodnotu relatívnej efektívnosti kalibrovaného snímača.

Pri prvotných kalibráciách je prvým cieľom stanoviť referenčný snímač na základe experimentálne získaných charakteristík citlivosti. Voľba referenčného snímača závisí na aplikácii výsledkov. Pri kalibrácii väčšej série snímačov je výhodnejšie stanoviť ako referenčný snímač ten doposiaľ najcitlivejší. Je nutné stanoviť charakteristiku kalibrovaného snímača. Následne sa porovnávajú hodnoty so snímacom referenčným a posúdi sa priamou úmerou citlivosť voči referenčnému snímaču v 5 stanovených a meraných softwarových zosilneniach. Hodnota je vyjadrovaná percentuálne (%). Keď snímač prekročí hranicu 100 % citlivosti referenčného snímača, môže byť

klasifikovaný ako najlepší možný a je možné ho teda stanoviť ako referenčný pre ďalšie kalibrácie.

Pri aplikácii výsledkov na pozorovanie degradácie snímačov je nutné považovať vždy jeden snímač za referenčný z dôvodu zmeny citlivosti v závislosti na dĺžke prevádzky pozorovaných snímačov.

Tabuľky 12,13,14 popisujú relatívnu efektivitu snímačov, kde bol ako referenčný snímač zvolený MDK-13-4.

Tab. 12 Hodnoty relatívnej citlivosti snímača MDK-13-1 vyjadrené v %

MDK-13-1	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
NB	71 %	84 %	86 %	82 %	81 %
DC	57 %	55 %	58 %	60 %	64 %
DOC	71 %	81 %	86 %	90 %	96 %
DIC	64 %	75 %	82 %	87 %	87 %

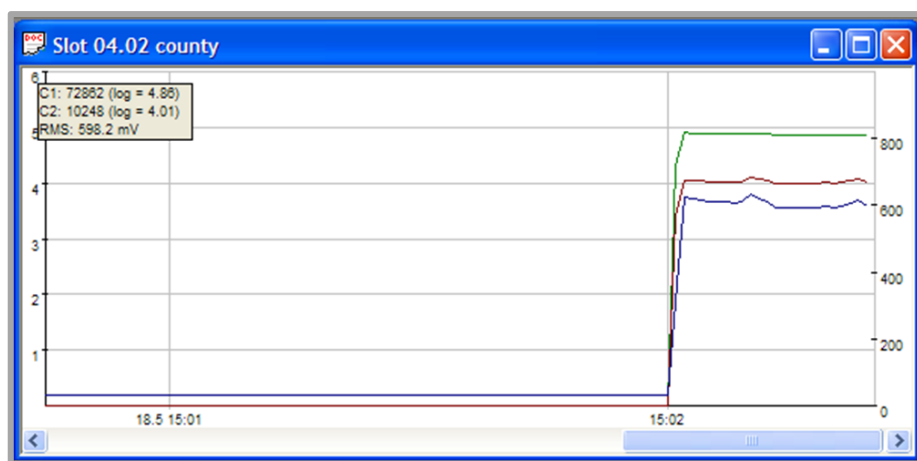
Tab. 13 Hodnoty relatívnej citlivosti snímača MDK-13-2 vyjadrené v %

MDK-13-2	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
NB	83 %	90 %	94 %	91 %	93 %
DC	63 %	70 %	77 %	80 %	85 %
DOC	84 %	88 %	88 %	91 %	91 %
DIC	79 %	86 %	91 %	91 %	85 %

Tab. 14 Hodnoty relatívnej citlivosti snímača MDK-13-3 vyjadrené v %

MDK-13-3	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
NB	44 %	61 %	84 %	67 %	67 %
DC	38 %	50 %	59 %	65 %	72 %
DOC	55 %	63 %	68 %	72 %	76 %
DIC	51 %	62 %	72 %	72 %	72 %

Najjednoduchšou metódou je odpisovanie meranej RMS priamo v reálnom čase kalibrácie (Obr. 5-24). Je však nutné sledovať RMS až po ustálení hodnôt. To nastáva okolo 4-5 sekundy kalibrácie, kedy sa zaznamenávaná energia vzniknutá začiatkom rotácie ložiska ustáli. Následne sa hodnoty RMS vpíšu do grafu RMS v závislosti na zosilnení a cez priamu úmernosť dostáva pre dané zosilnenia efektívnu citlivosť kalibrovaného snímača.



Obr. 5-24 Program Daemon pri experimente v reálnom čase

6 DISKUSIA

Pri relatívnej kalibrácii sa používa nespojitá udalosť AE. Zväčša sa jedná o normalizované zdroje (Hsu-Nielsenov zdroj, lom kapiláry, generátor pulzov). Snímače AE na tento impulz reagujú odozvou v tvare hitu AE. Preto kalibrácia týmto spôsobom nemusí vždy zaručovať obdobné chovanie ako u udalosti spojitaj, ktorým je príklad rotujúce ložisko. Hlavným určujúcim parametrom pri relatívnej kalibrácii je pritom maximálna amplitúda [5], ale pri spojitých udalostiach AE sa tento parameter s presnosťou nedokáže zaznamenať. Preto bolo nutné zvoliť parameter, ktorý by zodpovedal vyhodnocovaciemu postupu pri diagnostike ložísk metódou AE.

6.1 Konštrukčná časť

6.1

Prvým cieľom v tejto práci návrh a zostavenie funkčného experimentálneho zariadenia, ktoré je schopné relatívnej kalibrácie za podmienok, ktoré charakterizujú diagnostiku ložísk. Dôležitosťou sa vyznačoval fakt, že je nutné využiť rotácie ložiska ako zdroja AE a tým napodobiť podmienky skúšok ložísk.

Návrhy experimentálneho zariadenia vychádzali z experimentálnych zariadení, ktoré sa používajú pri diagnostike poškodenia ložísk a skúšok ich trvanlivosti. Pri riešení vznikli dva odlišné koncepčné návrhy, ktorých hlavná rozdielnosť bola v orientácii osy rotácie.

Prvý koncepčný návrh bol riešený na základe publikácie o experimentoch s otočnými ložiskami. Toto experimentálne zariadenie má osu rotácie orientovanú vertikálne [3]. Pre túto aplikáciu bola k dispozícii vyradená metalografická brúska, ktorá by po modifikácii a úprave podľa vytvoreného návrhu spĺňala predpoklad podmienok diagnostiky ložísk a teda aj relatívnej kalibrácie pri spojitaj AE.

Druhým návrhom bolo experimentálne zariadenie, navrhnuté na princípe zariadenia používaného pri monitorovaní chovania ložísk s poškodením a následným zaťažovaním [11]. Orientácia osy rotácie je horizontálneho typu (obvyklé diagnostických zariadení pre ložiská). Jedná sa o zariadenie jednoduchej konštrukcie, ktoré vytvára podmienky charakteru, zodpovedajúcemu diagnostike ložísk.

Ako favorizované riešenie sa zvolil druhý návrh z hľadiska nízkych nákladov na výrobu, jednoduchej manipulácie pri výmene referenčných ložísk a prenosnosti zariadenia. Snímače sa umiestňujú na tzv. kalibračné teleso, ktorého povrch je upravený a prispôsobený pre umiestnenie všetkých typov snímačov AE, ktoré používa ÚK. Zariadenie umožňuje zaťažovanie prostredníctvom upravenej skrutky.

6.2 Experimentálna časť

6.2

Pre relatívnu kalibráciu snímačov AE so spojitou udalosťou bolo nutné zvoliť vhodný vyhodnocovací parameter. Ako najpodstatnejší sa javí RMS (Root Mean Square), efektívna hodnota charakterizujúca energiu signálu. RMS je zaznamenávaná na základe zvolenej vzorkovacej frekvencie, ktorá sa pre kalibráciu zvolila 2 MHz.

Pre relatívnu kalibráciu sa zvolili 4 snímače s označením MDK-13, ktoré sa na ÚK používajú pri diagnostike ložísk. Jedná sa o piezoelektrické snímače s interným magnetom a predzosilňovačom o hodnote zosilnenia cca 35 dB [16] a plochou kontaktu 13 mm.

Prvým krokom experimentálnej časti boli merania citlivosti snímačov pri nespojitaj AE. Ako zdroj AE bol použitý Hsu-Nielsenov zdroj. Jednalo sa o experiment, ktorým sa overovala súvislosť chovania snímačov pri nespojitaj a spojitaj AE.

Na základe publikácie o monitorovaní pomalybežných ložísk [11] sa stanovilo, že pre zmenu RMS sa použijú ložiská s určitým typom poškodenia. Pri experimentoch pre stanovenie metódy kalibrácie sa zvolili guľkové ložiská s označením 6204. Jedná sa o valivé ložiská, s ktorými Ústav kontruování realizoval veľké množstvo únavových skúšok. Typy poškodenia boli vytvorené úmyselne pre stanovenie jasnej odozvy signálu na dané poškodenie. Pri experimentoch sa používali 4 ložiská, nepoškodené ložisko, ložisko s mechanicky poškodenou kľetkou, ložisko s poškodeným vonkajším krúžkom a ložisko s poškodeným vnútorným krúžkom.

Každé s vybraných ložísk generuje pri rotácii určitú hodnotu AE. Väčšie poškodenie spôsobuje vznik väčších elastických vln, takže piezoelektrický element generuje väčšie množstvo elektrického napätia.

Ako hlavné experimentálne ložisko sa na základe experimentov zvolilo ložisko s poškodeným vnútorným krúžkom. Toto ložisko vykazuje zvýšenie prijatej energie z dôvodu pittingu vytvoreného na vnútornom krúžku. Táto časť ložiska pri kalibrácii rotuje a má väčšiu obvodovú rýchlosť ako valivé elementy. Dochádza k častejšiemu kontaktu pittingu a valivých elementov. Z toho dôvodu nastáva generovanie AE, ktorej hodnoty RMS dosahujú vysokých hodnôt. Nevýhodou je vznik nadmerného hluku.

Experimenty pre stanovenie metódy kalibrácie predstavovali sériu meraní, ktoré monitorovali chovanie snímačov na spojitú AE. Pri meraní sa pozorovala RMS a následne vyhodnocovala. Podmienky konfigurácie vyhodnocovacieho programu boli totožné pri každom meraní s výnimkou jedného parametru, softwarového zosilnenia. To má pre citlivosť snímačov veľký význam a pri aplikáciách diagnostiky ložísk je tento parameter často upravovaný.

Experimenty boli realizované v 2 a 5 minútových intervaloch vždy pre softwarové zosilnenie 0, 5, 10, 15 a 20 dB. Taktiež bol pozorovaný vplyv väzbového média na kalibráciu a experimentálne vyvrátená možnosť kalibrácie „na sucho“ (bez väzbového média). Ďalej bol pozorovaný vplyv zmyslu otáčania ložiska. Pozornosť bola venovaná aj hladine šumu jednotlivých komunikačných kanálov, ktorá pri nízkych hodnotách RMS môže negatívne ovplyvniť výsledky kalibrácie. Hodnota hladiny šumu sa preto u jednotlivých meraní odpočítavala od výsledného signálu.

Softwarové zosilnenie 0 dB bolo volené z dôvodu, že kalibrované snímače MDK-13 obsahujú interný predzosilňovač.

Zosilnenia 5, 10, 15 a 20 dB boli volené ako východiskové pre monitorovanie chovania snímačov AE pri zvyšujúcom sa zosilnení. Po dokončení a vyhodnotení experimentov so všetkými ložiskami s použitím všetkých vybraných zosilnení, sa na základe aritmetických priemerom nameraných hodnôt vytvorili charakteristiky citlivosti kalibrovaných snímačov. Charakteristiky zobrazujú exponenciálnu závislosť hodnoty RMS na softwarovom zosilnení. Tieto charakteristiky sú určujúcim prvkom pri stanovovaní efektivity daného snímača.

Voľba referenčného snímača závisí na aplikáciách, na ktoré budú snímače použité. Táto práca odporúča pri kalibrácii veľkého množstva snímačov voliť najcitlivejší. Avšak pri sledovaní degradácie efektivity snímačov nie je nutné zvoliť najcitlivejší snímač referenčným. Je však nevyhnutné pokladať jeden snímač za referenčný pri celom experimente sledovania degradácie.

Z meraní a výsledných charakteristík sa ako referenčný snímač pri relatívnej kalibrácii spojitou AE volil MDK-13-4 a teda aj charakteristika tohto snímača je referenčnou.

Návrh výslednej metódy kalibrácie je založený na základe efektivity snímačov AE, vyjadrenej v % v závislosti od referenčného snímača. Tá sa získava výpočtom priamej úmernosti hodnôt RMS. Chovanie snímačov pri jednotlivých zosilneniach dosahuje vždy inej percentuálnej hodnoty. Preto bolo nutné vypočítať účinnosť v každom bode používaného zosilnenia a takto stanoviť efektivitu snímačov do 5dB intervalov.

Keďže metóda AE je veľmi presnou diagnostickou metódou je pri jej kalibrácii nutné odstránenie všetkých vonkajších nežiadúcich vplyvov. Preto by sa nadviazanie na túto prácu malo zaoberať spresňovaním výsledkov, vyhodnocovacieho postupu a metódy kalibrácie. Veľký význam má taktiež prítlak snímačov AE na povrch kalibračného telesa, ktorý by zaistil stabilnú prítláčnú silu. Táto práca však nie je venovaná vplyvu prítláčnej sily z dôvodu, že pri diagnostike ložísk metódou AE nie je vždy možné zaručiť prítlak snímačov. Modifikáciou experimentálneho zariadenia by preto mohli byť upínacie prvky. Pri použití prítláčnej sily a väzbového média sa zvyšuje presnosť nameraných dát.

7 ZÁVER

Táto diplomová práca bola zameraná na návrh a nasledovné overenie funkčnosti prenosného experimentálneho zariadenia, ktoré umožňuje porovnávať piezoelektrické snímače AE princípom relatívnej kalibrácie pri spojitý AE. Ďalej bolo cieľom na základe experimentálnych meraní vytvoriť návrh metódy kalibrácie, ktorá umožňuje klasifikáciu snímačov AE podľa citlivosti. Všetky hlavné a dielčie ciele diplomovej práce boli splnené.

Experimentálne zariadenie je funkčné a je možné ho používať pre relatívnu kalibráciu rôznych typov snímačov AE. Na zariadenie je možné umiestniť snímače do veľkosti kontaktnej plochy 17 mm. Jedná sa o prenosné zariadenie, ktoré je napájané zo siete s napätím 230 V.

Experimentálna časť bola zameraná na chovanie snímačov pri zmene softwarového zosilnenia. Taktiež sa monitorovala odozva snímačov na rôzne druhy poškodenia ložísk. Merania boli realizované v časových intervaloch 2 a 5 minút, pri ktorých bol pozorovaný vplyv zmyslu otáčania ložiska na hodnotu RMS. Experimentálne bolo potvrdené, že zmysel otáčania ložiska má vplyv na RMS, avšak kalibráciu tento fakt zásadne neovplyvňuje. V priebehu experimentálnej časti sa potvrdil zásadný vplyv použitia väzbového média a vylúčila sa tým možnosť kalibrácie „na sucho“.

Metódu kalibrácie umožňujú vytvorené charakteristiky citlivosti 4 pozorovaných snímačov s označením MDK-13. Charakteristiky snímačov zobrazujú experimentálne overený priebeh závislosti RMS na softwarovom zosilnení. Porovnaním hodnôt RMS kalibrovaného a referenčného snímača sa dostáva relatívna citlivosť kalibrovaného snímača.

Výstupy dosiahnuté v tejto diplomovej práci je možné využiť pri kalibrácii ďalších snímačov AE, ale aj pri diagnostike poškodenia ložísk a následnú elektrickú odozvu piezoelektrických snímačov AE.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV**8**

- [1] TANDON, N., G.S. YADAVA, K.M. RAMAKRISHNA, Hongtao ZHU, Craig A.S. MOODIE a Qiang ZHU. A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings: Review and application for low speed slew bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2007, **21**(1), 244-256 [cit. 2016-05-01]. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.08.005. ISSN 08883270.
- [2] CAESARENDRA, Wahyu, Buyung KOSASIH, Anh Kiet TIEU, Hongtao ZHU, Craig A.S. MOODIE a Qiang ZHU. Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2016, **72-73**, 134-159 [cit. 2016-05-01]. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.10.020. ISSN 08883270.
- [3] HORT, F., VLAŠIC, F. MAZAL, P. Vybrané aplikace metody AE v Ústavu konstruování FSI VUT v Brně. In *49. Int. Conf. KCMS 2008, Srní 8. - 10. 9. 2008*, ZČU Plzeň, 2000, s. 87-90. ISBN 978-80-7043-718-6.
- [4] PŘIBÁN, Miroslav. *Metoda akustické emise I AE*. Česká společnost pro NDT, Brno: Certifikační sdružení pro personál APC, Praha, 2012.
- [5] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [6] BEATTIE, Alan G. Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques. No. SAND2013-7779. Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2013.
- [7] BENEŠ, Jiří a Petr KEPRT. A COMPARISON OF AE SENSOR CALIBRATION METHODS. In: *Database and Journal of Nondestructive Testing* [online]. Brno, 612 00, Czech Republic: Acoustic Emission Group, 2008 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: www.ndt.net/article/jae/papers/26-060.pdf
- [8] MILLER, R. K., HILL, E. K. *Acoustic emission testing*. 3rd ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005, 446 s. ISBN 15-711-7106-1.

- [9] ZHOU, Wei, Thomas G. HABETLER a Ronald G. HARLEY. Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review. *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*[online]. IEEE, 2007, , 3-6 [cit. 2016-05-01]. DOI: 10.1109/DEMPED.2007.4393062. ISBN 978-1-4244-1061-3.
- [10] VAN HECKE, Brandon, Jae YOON, David HE, Hongtao ZHU, Craig A.S. MOODIE a Qiang ZHU. Low speed bearing fault diagnosis using acoustic emission sensors: Review and application for low speed slew bearing. *Applied Acoustics* [online]. 2016, **105**, 35-44 [cit. 2016-05-01]. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.10.028. ISSN 0003682x.
- [11] *Acoustic Emission Sensors* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.soundwel.cn/enproducts/67.html>
- [12] *Monitoring of health of a bridge using acoustic emission technique* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <https://my.vanderbilt.edu/ozguryapar/research-experience/ae/>
- [13] SUCHANEK, D. *Úprava zkušebního zařízení ložisek pro aplikaci metody akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [14] KEKYRAS, S., C., WILCOX, S., J., BORTHWICK, W., D., K., REUBEN, R, L. Acoustic Emission monitoring of Turning Operations using PVdF Film and PZT Sensors. AEWG 35. Boston 1991, p. 72 – 79
- [15] BRECKENRIDGE, Franklin R. Surface-wave displacement: Absolute measurements using a capacitive transducer. Boston. ISBN 10.1121/1.385698.
- [16] J. Szelazek: Elektromagneto-akustické ultrazvukové převodníky - konstrukční příklady a použití. ASNT: Materials Evaluation. 1996, vol. 54 (8), s. 926 – 934.
- [17] ENOKI, M., M. WATANABE, P. CHIVAVIBUL a T. KISHI. Non-contact measurement of acoustic emission in materials by laser interferometry. Kidlington, Oxford: Elsevier, c2000-, v. ISBN 10.1016/s1468-6996(00)000176.
- [18] Resonant Acoustic NDT Technologies [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.resonic.com>.
- [19] *System Dakel Xedo* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/dev/xedo>

- [20] AC motor speed controller circuit. Electroschematics [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.electroschematics.com>
- [21] KARS Elektromotory. KARS [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://www.kars-brno.cz>
- [22] Spojka EK7. *R+W Couplings* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.rw-america.com>

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

<i>AE</i>		akustická emisia
<i>RMS</i>	mV	root mean square
<i>NDT</i>		nedeštruktívne skúšanie
<i>EMAT</i>		electromagnetic acoutic trancuder
<i>NB</i>		Non-damage bearing
<i>DC</i>		Damage cage
<i>DOC</i>		Damage of outer circuit
<i>DIC</i>		Damage of inner circuit

10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

10

Obr. 1-1 Princíp Akustickej emisie [12]	13
Obr. 2-1 Typy piezoelektrických AE snímačov [11]	15
Obr. 2-2 Detail piezoelektrického AE snímača [8]	15
Obr. 2-3 Princíp elektromagneticko-akustického snímača [18]	16
Obr. 2-4 Ukážka frekvenčných a časových charakteristík snímačov AE [4]	17
Obr. 2-5 Absolútna kalibrácia AE snímačov realizovaná na FEKT [4]	18
Obr. 2-6 Relatívna kalibrácia AE snímačov [4]	19
Obr. 2-7 Stanica pre skúšky pomalybežných ložísk [10]	20
Obr. 2-8 Stanica pre skúšky pomalybežných ložísk [10]	20
Obr. 2-9 Stanica pre skúšky otočných ložísk [2]	21
Obr. 2-10 Detail stanice pre skúšky otočných ložísk [2]	21
Obr. 2-11 Stanica pre skúšky radiálnych ložísk [13]	22
Obr. 2-12 Model stanice pre skúšky radiálnych ložísk [13]	23
Obr. 2-13 Modifikovaný model stanice pre skúšky radiálnych ložísk pomocou metódy AE [13]	23
Obr. 3-1 Parametre AE hitu pre jednu udalosť [2]	24
Obr. 4-1 Koncept experimentálneho zariadenia vzniknuté modifikáciou metalografickej brúsky	26
Obr. 4-2 Rotačné prvky koncepčného riešenia (oranžová farba značí rotačné prvky)	27
Obr. 4-3 Skelet metalografickej brúsky	27
Obr. 4-4 Model kalibračnej časti s podpernými ložiskami	28
Obr. 4-5 Model s voľným koncom hriadeľa	28
Obr. 4-6 Model s podperným hrotom	29
Obr. 4-7 Schéma experimentálneho zariadenia	29
Obr. 4-8 Favorizované riešenie	30
Obr. 4-9 Hsu-Nieslenov zdroj	30
Obr. 4-10 Hity AE získané Hsu- Nielsenovým zdrojom	31
Obr. 4-11 Merací reťazec pre kalibráciu	31
Obr. 4-12 Systém DAKEL XEDO	32
Obr. 4-13 Nastavenie konfigurácie systému v programe Daemon	33
Obr. 4-14 Príklad frekvenčnej charakteristiky typu MDK-13	35
Obr. 4-15 Snímače použité pri kalibrácii	36
Obr. 5-1 3D model experimentálneho zariadenia	37
Obr. 5-2 Posunutie kalibračnej časti pre možnosť uloženia ihličkových ložísk	38
Obr. 5-3 Kalibračné teleso	39
Obr. 5-4 Umiestnenie snímačov na experimentálne zariadenie	39
Obr. 5-5 Schéma zapojenia elektromotoru [16]	40
Obr. 5-6 Regulátor otáčok pre elektromotory menších výkonov	40
Obr. 5-7 Zostavený prototyp experimentálneho zariadenia	41
Obr. 5-8 Prototyp experimentálneho zariadenia	42
Obr. 5-9 Schéma experimentu s pentestom	43
Obr. 5-10 Maximálne amplitúdy pre zosilnenie 5 dB	44
Obr. 5-11 Maximálne amplitúdy pre zosilnenie 10 dB	44
Obr. 5-12 Príklad grafu nameraných hodnôt v časovom spektre	46

Obr. 5-13 Hodnoty RMS v závislosti na čase pri meraní s 0 dB zosilnením a ložiskom s poškodeným vonkajším krúžkom	47
Obr. 8-14 Hodnoty RMS v závislosti na čase pri meraní s 0 dB zosilnení a ložiskom s poškodenou kľetkou	47
Obr. 5-15 Hodnoty RMS v závislosti na čase pri meraní s 10 dB zosilnení a ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom	48
Obr. 5-16 Hodnoty RMS v závislosti na čase pri meraní s 20 dB zosilnení a ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom	49
Obr. 5-17 Hodnoty sledovanej veličiny pri 5 minútovom meraní s 20 dB zosilnením a ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom	50
Obr. 5-18 Hodnoty sledovanej veličiny pri meraní v ľavom zmysle otáčania s 20 dB zosilnením a ložiskom s poškodeným vnútorným krúžkom	51
Obr. 5-19 Hodnoty sledovanej veličiny RMS pri meraní bez väzbového média s 20 dB zosilnením a ložiskom s poškodenou kľetkou	51
Obr. 5-20 Charakteristika citlivosti v závislosti na type poškodenia snímača MDK-13-1	52
Obr. 5-21 Charakteristika citlivosti v závislosti na type poškodenia snímača MDK-13-2	53
Obr. 5-22 Charakteristika citlivosti v závislosti na type poškodenia snímača MDK-13-3	54
Obr. 5-23 Charakteristika citlivosti v závislosti na type poškodenia snímača MDK-13-4	55
Obr. 5-24 Program Daemon pri experimente v reálnom čase	56

11 ZOOZNAM TABULIEK**11**

Tab. 1 Skratky popisov ložísk	45
Tab. 2 Počiatočná hladina komunikačných kanálov použitého analyzátoru Dakel Xedo	46
Tab. 3 Priemery sledovaných hodnôt RMS pri 0 zosilnení	48
Tab. 4 Priemery sledovaných hodnôt RMS pri ložisku DIC a 10dB zosilnení	49
Tab. 5 Priemery sledovaných hodnôt RMS pri ložisku DIC s 20dB zosilnením	49
Tab. 6 Priemery RMS signálu DIC, zosilnenie 20 dB, 5 minútový test	50
Tab. 7 Priemery RMS signálu DIC, zosilnenie 20 dB, ľavý zmysel otáčania	50
Tab. 8 Aritmetické priemery RMS snímača MDK-13-1	53
Tab. 9 Aritmetické priemery RMS snímača MDK-13-2	53
Tab. 10 Aritmetické priemery RMS snímača MDK-13-3	54
Tab. 11 Aritmetické priemery RMS snímača MDK-13-4	54
Tab. 12 Hodnoty relatívnej citlivosti snímača MDK-13-1 vyjadrené v %	56
Tab. 13 Hodnoty relatívnej citlivosti snímača MDK-13-2 vyjadrené v %	56
Tab. 14 Hodnoty relatívnej citlivosti snímača MDK-13-3 vyjadrené v %	56

12 ZOZNAM PRÍLOH

- Funkčný vzorek experimentálneho zariadenia
- Laboratórny protokol kalibrácie snímača
- Výkres zostavy experimentálneho zariadenia