

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ÚPRAVA ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ LOŽISEK PRO APLIKACI METODY AKUSTICKÉ EMISE

MODIFICATION OF EXPERIMENTAL ARRANGEMENT FOR BEARINGS TESTING FOR
APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. DANIEL SUCHANEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL MAZAL, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Daniel Suchanek

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

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

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

Úprava zkušebního zařízení ložisek pro aplikaci metody akustické emise

v anglickém jazyce:

Modification of experimental arrangement for bearings testing for application of acoustic emission method.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh a praktické ověření úprav zařízení pro zkoušení ložisek s využitím diagnosticky metodou akustické emise.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

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

Forma diplomové práce: průvodní zpráva s technickou dokumentací.

Typ práce: konstrukční

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost Ústavu konstruování.

Seznam odborné literatury:

- 1) I.A.Scott: Basic Acoustic Emission, NDT Monographs and Tracts, Vol.6, 1991, ISBN 2-88124-352-5.
- 2) Stolarski T.A.: Rolling Contacts, PEP London, 2002, ISBN 1-86058-296-6.
- 3) Suresh,S.: Fatigue of Materials, Cambridge University Press, 1998,U.K.,ISBN 0-521-57847.
- 4)L.Pazdera, J.Smutný, P.Mazal: Využití metody AE při sledování vlastností materiálů, VUT v Brně, Brno 2004, ISBN 80-214-2502-3

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 26.11.2008

L.S.

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

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřená na konstrukční úpravu zařízení pro zkoušky trvanlivosti valivých radiálních ložisek tak, aby bylo možné aplikovat diagnostickou metodu akustické emise. Je předpoklad, že metoda AE umožní identifikovat poškození ložisek v dřívějších stádiích než vibrační diagnostika. Konstrukční úpravy umožňují i doplnění systému moderními vibrodiagnostickými prostředky.

KLÍČOVÁ SLOVA

valivé ložisko, diagnostika, vibrace, akustická emise, vlnovod

ABSTRACT

Master's thesis is focused on modification of experimental arrangement for radial ball bearing contact endurance testing so that the diagnostic method of acoustic emission could be applied. There is an assumption that AE method is able to identify damage to bearings in earlier stages than the vibration diagnostics. Design modifications also allow the addition of modern vibrodiagnostic equipment to a system.

KEYWORDS

rolling bearing, diagnostics, vibrations, acoustic emission, waveguide

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DLE ČSN ISO 690

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.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci *Úprava zkušebního zařízení ložisek pro aplikaci metody akustické emise* napsal samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Mazala, CSc. a uvedl v seznamu všechny literární i jiné zdroje.

V Brně 21. května 2009

.....
Daniel Suchanek

PODĚKOVÁNÍ

Chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly k vytvoření této práce, studentům doktorského studia Ing. Filipovi Hortovi a Ing. Františkovi Vlašicovi za praktickou pomoc v laboratoři, a také svým rodičům a kamarádům, kteří mě při tvorbě diplomové práce a studiu podporovali.

ÚVOD	15
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	16
1.1 Základní pojmy diagnostiky valivých ložisek	16
1.2 Valivá ložiska	17
1.3 Poškození valivých ložisek	19
1.4 Zpracování diagnostického signálu	20
1.5 Vibrační diagnostika	21
1.5.1 Popis metody	21
1.5.2 Snímače	22
1.5.3 Zpracování a vyhodnocení vibrodiagnostického signálu	23
1.6 Akustická emise	26
1.6.1 Popis metody	26
1.6.2 Snímače	27
1.6.3 Zpracování a vyhodnocení signálu AE	27
1.7 Vlnovody	29
1.8 Zkušební zařízení ložisek	31
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA	33
2.1 Popis zkušebního zařízení ložisek SA67	33
2.1.1 Typy prováděných zkoušek	38
2.2 Diagnostické prostředky DAKEL	38
2.3 Požadavky na úpravu	42
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	44
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	45
5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	46
5.1 Varianty řešení	46
5.2 Zvolená varianta řešení	47
6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	50
7 KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ	58
7.1 Měření pro ověření konstrukčních úprav	58
7.1.1 Příprava stanice pro měření	58
7.1.2 Záznam signálu AE	60
7.2 Ekonomický rozbor	61
7.3 Závěr	61
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	64
9.1 Seznam použitých zkratk	64
9.2 Seznam použitých symbolů a veličin	64
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	65
11 SEZNAM TABULEK	67
12 SEZNAM PŘÍLOH	68

ÚVOD

Snahou technické civilizace je již odedávna zajistit dlouhý, bezporuchový provoz strojů s minimálními nároky na provoz a údržbu. Proto se společně s vývojem výpočetní techniky, automatizace, zdokonalováním strojů a aplikací nových technologií vyvíjely patřičné postupy a metody, které pomáhaly zvýšit produktivitu, prodloužit životnost strojů a dosáhnout větších finančních úspor. Valivá ložiska jsou jednou z oblastí, ve které se výrazně zvýšily nároky na provozní vlastnosti, a proto bylo potřeba vyvíjet stále lepší způsoby, jak těmto potřebám vyhovět. Nejdříve vznikly postupy, které pomáhaly určit trvanlivost valivých ložisek. Zprvu se jednalo pouze o experimenty, později však díky znalostem fyzikální podstaty dějů probíhajících v ložiskách byly odvozeny rovnice, pomocí kterých bylo možné vypočítat minimální trvanlivost i pro jiné provozní podmínky, než ve kterých byl experiment proveden. Tyto výpočty se dále upřesňovaly a prováděly se jednotlivé korekce, které zahrnovaly typ ložiska a přibližovaly skutečné provozní podmínky. Na začátku roku 2007 byla mezinárodní organizací pro standardizaci zahrnuta teorie trvanlivosti ložisek podle SKF do normy ISO 281 (viz. [2]).

Aby bylo zabráněno poruchám strojů, jsou používány výpočty intervalů preventivních výměn ložisek, to však není příliš efektivní. Pomocí výpočtů založených na určitých počátečních předpokladech není možné určit skutečný stav ložiska, které mohlo projít ději, které ve výpočtech nebyly zahrnuty, a přesto mohly významně ovlivnit jeho životnost. Zjištění stavu ložisek vizuálně, tj. rozebráním stroje v provozu je prakticky nereálné, proto vznikl obor technické diagnostiky, který se zabývá bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky pro stanovení technického stavu.

V současné době se stále používá experimentální zjišťování trvanlivosti ložisek pro stanovení a ověření základních parametrů ložiska. Trvanlivost je určena na základě vybraných charakteristických diagnostických veličin dané použité diagnostické metody. V současné době je nejpoužívanější metodou pro ověřování trvanlivosti valivých ložisek vibrační diagnostika. U této metody měření probíhá do doby překročení nastavené velikosti vibrací. Při použití progresivnější výpočetní techniky je také možné sledovat trendy vývoje poškození.

V poslední době je stále větší snaha o využití metody akustické emise, pomocí které je možné detekovat poškození ještě v útlejších fázích na atomární úrovni. S tím jsou ale spojeny větší nároky na diagnostické prostředky a způsob úpravy diagnostického signálu, jelikož s větší citlivostí je spojena větší úroveň šumu.

V této práci je představen praktický příklad aplikace metody akustické emise na zkušebním zařízení valivých ložisek včetně ověření provedených konstrukčních úprav kontrolním měřením akustické emise, z jejíhož záznamu by mělo být možné identifikovat stupeň poškození valivého ložiska.

1 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

Technická diagnostika je moderním nástrojem údržby, pomocí níž je možné předejít haváriím a zabránit tak například poškození souvisejících součástí. Použitím technické diagnostiky je možné odhalit poškození, lokalizovat ho, určit jeho velikost, která vypovídá o jeho závažnosti, tudíž o schopnosti ložiska plnit požadovanou funkci a to včetně požadovaných kvalit, a v neposlední řadě sledovat vývoj poškození, pomocí kterého je možné určit příčinu poškození a stanovit, jak dále postupovat. Takto je možné vyhnout se neplánovaným odstávkám a uspořít finance. Technická diagnostika slouží také k optimalizaci provozu, pro určení provozních podmínek, při kterých stroj pracuje nejefektivněji. To vede ke zvýšení jeho spolehlivosti, která je známkou jakosti. Aby byla diagnóza jednoznačná a věrohodná, je důležitá správnost použití diagnostických metod a prostředků. To stanovují příslušné normy, které byly vytvořeny na základě dlouholetých zkušeností a po velkém počtu měření. Provádění technické diagnostiky je stále ještě nákladnou záležitostí a to z důvodů nároků na zařízení, které je potřeba pro zachycování a zpracování signálu, zvláště drahé jsou například analogové filtry, proto se diagnostika provádí nejčastěji tam, kde je dosaženo větších úspor, než jsou náklady na její provedení, nebo tam, kde by selhání valivých ložisek mělo za následek ohrožení lidských životů.

Pro diagnostiku je velmi důležité vědět, jaké ložisko diagnostikují. Ložiska stejné rozměrové řady od různých výrobců se mohou podstatně lišit vnitřní konstrukcí, proto je důležité znát způsob označování ložisek daného výrobce a jejich parametry potřebné pro stanovení diagnózy. Technická diagnostika je oborem, ve kterém se neustále vyvíjejí nové diagnostické metody a prostředky, proto je také významnou oblastí zájmu výzkumu.

Jednotlivé diagnostické metody jsou před aplikací v běžném provozu nejdříve prověřovány v laboratořích, kde se měření provádějí v daleko větším rozsahu. Ze získaných dat jsou pak vybrány parametry, které pro danou aplikaci v praxi dostatečně popisují vznikající poškození.

Diagnostické metody jako sledování parametrů stroje, termodiagnostika nebo hluková diagnostika jsou blíže popsány v bakalářské práci, na kterou tato diplomová práce navazuje. Tato práce se zabývá pouze metodou vibrační diagnostiky a metodou akustické emise, které jsou v současné době základem pro odborné hodnocení technického stavu ložisek.

1.1 1.1 Základní pojmy diagnostiky valivých ložisek

Diagnostika ložisek je částí technické diagnostiky, která je vědním oborem zabývajícím se bezdemontážním a nedestruktivním zjišťováním technického stavu objektu. Slovo „diagnóza“ pochází z řečtiny a znamená „skrze poznání“. Cílem technické diagnostiky je detekovat poškození, lokalizovat ho a zjistit jeho velikost, která vypovídá o závažnosti poškození. Součástí technické diagnostiky je také zjišťování příčin vzniku a šíření poškození.

Pro hodnocení poškození valivých ložisek se používají diagnostické metody. Ty využívají diagnostické prostředky, které se skládají z technických zařízení a pracovních postupů. Pracovní postup je algoritmem, který zahrnuje programové vybavení pro vyhodnocování dat, metody zpracování signálu, metod výběru diagnostických parametrů, vytvoření matematických modelů atd. Diagnostické

prostředky lze rozdělit na ON-LINE a OFF-LINE prostředky. ON-LINE prostředky jsou používány pro kontinuální monitorování technického stavu ložisek. Pomocí nich je možno lépe sledovat trendy. ON-LINE měřicí prostředky mohou být zakomponovány do zpětnovazebního řídicího systému a propojeny s interaktivními počítačovými systémy, které jsou nejen schopny včasné upozornit na riziko poruchy, tj. ukončení provozuschopnosti stroje, ale také zareagovat na krizovou situaci změnou provozních parametrů nebo zastavením stroje bez lidské obsluhy. Počítačové systémy umožňují nastavení mezí přípustného technického stavu, ten je dán hodnotami měřených veličin a jejich vzájemnými relacemi v daném časovém okamžiku. Pokud dojde k překročení mezí přípustného technického stavu, dochází k poruše, tj. konec provozuschopnosti ložiska. Aby bylo tomuto jevu zabráněno, jsou sledovány trendy, na základě kterých je možné dostatečně brzo předpokládat, kdy dojde k meznímu stavu. Díky tomu je možné ponechat ložisko déle v provozu, pokud splňuje požadované vlastnosti, popřípadě změnit provozní podmínky, naplánovat údržbu, výměnu a minimalizovat tak riziko neplánovaného odstavení stroje nebo také předejít poruchám, které by mohly mít za následek poškození ostatních součástí stroje. Takto je možné zvýšit spolehlivost stroje a docílit významných finančních úspor. OFF-LINE prostředky jsou také nazývány pochůzkovými prostředky a slouží pro určení okamžitého stavu ložiska a sběr dat pro podrobnější analýzu.

Základem technické diagnostiky je měření, které se provádí podle obecných norem určování technického stavu a norem specifických pro danou metodu. Měření se provádí pomocí snímačů a získávají se tak sumární hodnoty, podle kterých je možné stanovit, zda je přítomna závada. Pokud je nalezena, provádí se podrobné měření a analýzy měřeného signálu.

Všechny běžně používané metody diagnostiky ložisek jsou uvedené v normách ISO. Velká část směrnic pro diagnostiku ložisek je zahrnuta v řadě norem pod společným názvem „Monitorování stavu a diagnostika strojů“. V normách se kromě popisů metod, postupů měření, zpracování dat a jejich vyhodnocování nacházejí také doporučení pro výběr vyhodnocovacích parametrů, snímačů a jejich umístění podle typu stroje, ve kterém jsou ložiska použity. Normy pro jednotlivé metody jsou stanovené pro určitý rozsah měřených veličin, pokud se veličiny nacházejí mimo tento rozsah, je třeba hledat jiná řešení. V dnešní době je diagnostika založena více na časovém vývoji měřených hodnot než pouhým srovnáváním s limitními hodnotami (viz. [1], [11]).

1.2 Valivá ložiska

Valivá ložiska patří k významným a velmi přesným strojním součástem, které umožňují přenos zatížení při vzájemném otáčivém nebo posuvném pohybu jeho částí. Síly jsou přenášeny pomocí valivých těles, které jsou umístěny v kleci nejčastěji mezi kroužky, tím je nahrazeno kluzné tření značně menším valivým.

Podle směru převažujících přenášených sil dělíme valivá ložiska na radiální (většina sil působí kolmo na osu otáčení) a axiální (většina sil působí ve směru osy otáčení). Neexistuje přesná hranice mezi těmito základními skupinami ložisek, protože většina radiálních ložisek může přenášet také axiální síly a některé druhy axiálních ložisek jsou schopny zachytit i radiální zatížení. Podle tvaru valivých těles se rozlišují v každé skupině ložiska kuličková, válečková, jehlová, soudečková a kuželíková. Základní únosnost je v rozměrových tabulkách uvedena pro to zatížení, které převládá. Zatížení se dělí na statické a dynamické. Při statickém zatížení je ložisko

zatíženo v klidu nebo při pomalém pohybu a při dynamickém se zatížené valivé ložisko otáčí.

Z hlediska výpočtů je pro statické zatížení rozhodující trvalá deformace na funkčních plochách ložiska, v případě dynamického zatížení je pro výpočet rozhodující trvanlivost ložiska. Pod pojmem trvanlivost se rozumí počet otáček, které ložisko vykoná nebo dobu chodu, než se objeví první známky kontaktní únavy na materiálu valivých těles nebo oběžných dráhách. Podle doporučení ISO s ohledem na provozní bezpečnost byla stanovena základní trvanlivost L_{10} , tj. trvanlivost, které dosáhne nebo ji překročí 90% většího množství stejných ložisek při stejných provozních podmínkách.

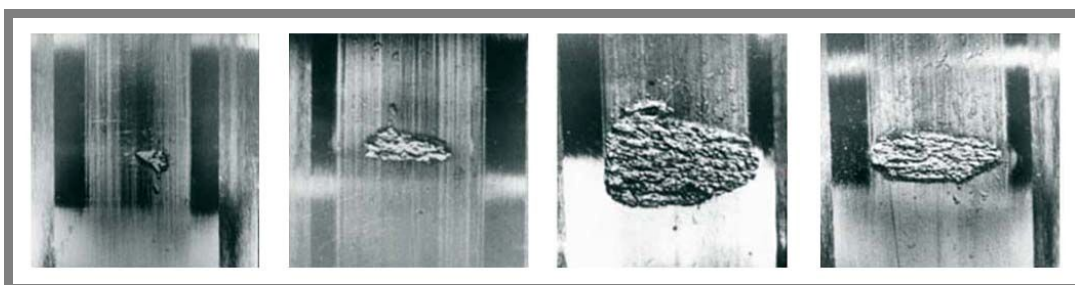
Největší neproměnné zatížení, při jehož působení dosáhne 90% ložisek z větší skupiny stejných ložisek základní trvanlivosti miliónu otáček, je nazýváno základní dynamickou únosností C_{10} . Základní dynamická únosnost je u radiálních ložisek určena pro neproměnné čistě radiální zatížení a u axiálních ložisek pro neproměnné čistě axiální zatížení. Vztah mezi základní trvanlivostí, základní dynamickou únosností a zatížením ložiska vyjadřuje rovnice trvanlivosti, která platí pro všechny typy ložisek. Pokud je ložisko zatěžováno v radiálním i axiálním směru, dosazuje se do rovnice ekvivalentní zatížení, které má stejný vliv na vznik poruchy jako působení axiálního a radiálního zatížení zároveň. Modifikovaná rovnice trvanlivosti obsahuje součinitele, které přibližují skutečné provozní podmínky: mazání, typ ložiska, uložení a zatížení. Doba do vyřazení ložiska z provozu kvůli ztrátě požadovaných provozních vlastností i z jiných příčin, než je pitting, je nazývána životností ložiska (viz. [3], [4]).



Obr. 1.2-1 Valivá ložiska [5]

1.3 Poškození valivých ložisek

Valivá ložiska, stejně jako jiné strojní součásti, podléhají degradačním procesům opotřebení, které jsou způsobeny interakcí zatížených a vzájemně pohybujících se povrchů nebo vlivem provozního prostředí, a vedou k úbytku materiálu. V extrémních případech může vlivem kumulace poškození nebo velkých rázů dojít k lomům materiálu. Ve většině případů poškození ložisek nebývá prvotní příčinou problému, bývá obvykle následkem jiné závady stroje. Rozlišuje se poškození kroužků, valivých těles, klece a popř. těsnění. Za ideálních provozních podmínek bývá příčinou omezené životnosti ložisek zpravidla pouze vydrolování materiálu provázeno vznikem důlků s charakteristickým lasturovým lomem, tzv. pitting. Jedná se o kontaktní únavu materiálu, která je způsobena opakujícím se místním zatížením na kroužku nebo valivém tělese.



Obr. 1.3-1 Vývoj poškození ložiska [10]



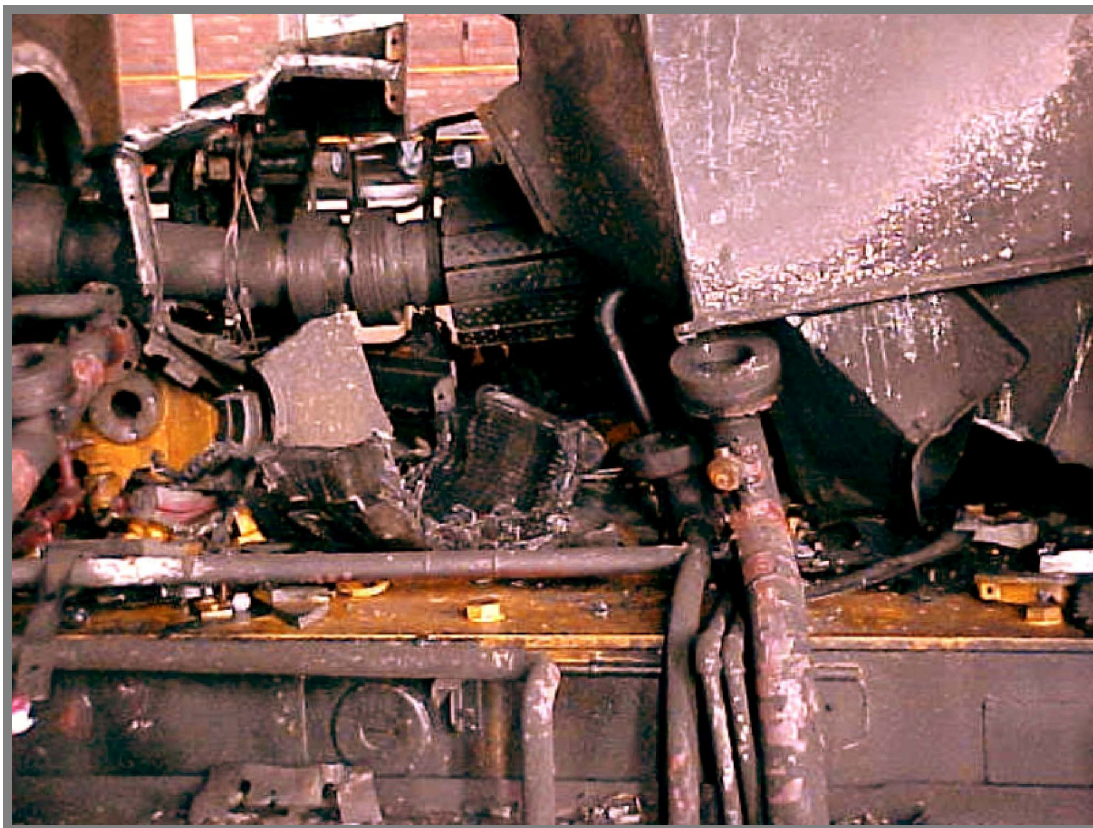
Obr. 1.3-2 Pitting na kroužku ložiska a valivém tělese ve velmi pokročilém stádiu [7]

V běžných provozních podmínkách mohou být poškození valivých ložisek způsobena nesprávnou montáží a uložením (volba nevhodného nářadí nebo postupu, nešetrné zacházení, nadměrné nasunutí, nesouosost, nevyváženost, nesprávný geometrický tvar hřídele, nekvalitní opracování stykových ploch), provozními podmínkami a údržbou (nevhodné mazání, extrémní teploty, vlhkost, znečištění, přetěžování, vibrace, předpětí, průchod elektrického proudu, koroze). K těmto poškozením patří zejména opotřebení způsobené abrazivními částicemi, vibracemi nebo nedostatečným mazáním, při kterém dochází k prudkému zvýšení teploty, vtisky způsobené částicemi nečistot, chybnou montáží nebo přetížením, poškozená čela valivých těles a přírub, oděr valivých těles a oběžných dráh prokluzu, styková nebo hloubková koroze, poškození způsobené průchodem elektrického proudu, odlupování způsobené předpětím, oválnou deformací, axiálním zatížením,

nesouosostí, vtisky, oděrem, stykovou korozí, rýhami, jamkami a trhliny způsobené nešetrným zacházením, nadměrným nasunutím, oděrem nebo stykovou korozí.

Poškození klece bývá způsobeno vibracemi, nadměrnými otáčkami, opotřebením oděrem, zablokováním nebo nesouosostí. Klec je vyrobena z měkkého materiálu, proto je jako první ovlivněna nedostatečným mazáním. Pokud se otvory pro valivá tělesa zvětší následkem opotřebení, mohou výsledné síly vést k rozlomení klece. K lomům klece mohou taktéž vést setrvačné síly způsobené vibracemi nebo nadměrnými otáčkami.

Důležitá je velikost a rozsah poškození, které určují, zda ložisko dosahuje požadovaných vlastností. Podstatná je také rychlost vývoje poškození, která určuje životnost ložiska. Z hlediska diagnostiky je s ohledem na použití zařízení a metod důležité rozlišovat v jakém stádiu se poškození nachází. Prvotním poškozením je nazýván jev, kdy dojde k prvnímu styku kov-kov, přitom vzniká akustická emise, která se šíří tělesem ložiska (viz. [6]).



Obr. 1.3-3 Havárie turbíny následkem závažného poškození valivých ložisek [10]

1.4

1.4 Zpracování diagnostického signálu

Signál od snímače, který vzniká posuvy povrchu nebo akustickým tlakem, prochází měřicí trasou, která se skládá ze snímače, předzesilovače, kabelové trasy a měřícího systému, ve kterém je signál koncově zpracován. Poté se signál vyhodnocuje, tj. různými přístupy se zkoumá velikost poškození, jeho časový vývoj, příčiny jeho vzniku a místo, kde se vyskytuje [17].

Diagnostický signál se v měřícím systému zpracovává nejdříve analogicky, poté se provádí digitalizace pomocí analogově-číslicových převodníků, aby bylo možné

zpracování signálu výpočetní technikou, která umožňuje používat různé algoritmy pro zpracování signálu a usnadňuje jeho přenos. Při převádění signálu do číslicové podoby je však potřeba vyvarovat se negativnímu jevu aliasingu, ke kterému může dojít v případě, kdy frekvence odebrání vzorku, tzv. vzorkování, není dostatečně velká ve srovnání s maximální frekvencí snímaného signálu. Proto se používají antialiasingové filtry, aby se předešlo nesmyslným výsledkům. Dále následují analýzy pro popis vlastností signálu z hlediska amplitudy a popisu signálu v časové oblasti, poté se provádí spektrální analýzy hlavně pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT), lokalizace poškození se pak provádí analýzami fází. Souhrnem analýz a zpracování signálu lze pak přesně specifikovat poškození a navrhnout správné řešení situace. [1, 17]

1.5 Vibrační diagnostika

1.5

V současné době je tato diagnostická metoda nejrozšířenější a nejpoužívanější pro odborné hodnocení technického stavu valivých ložisek.

1.5.1 Popis metody

1.5.1

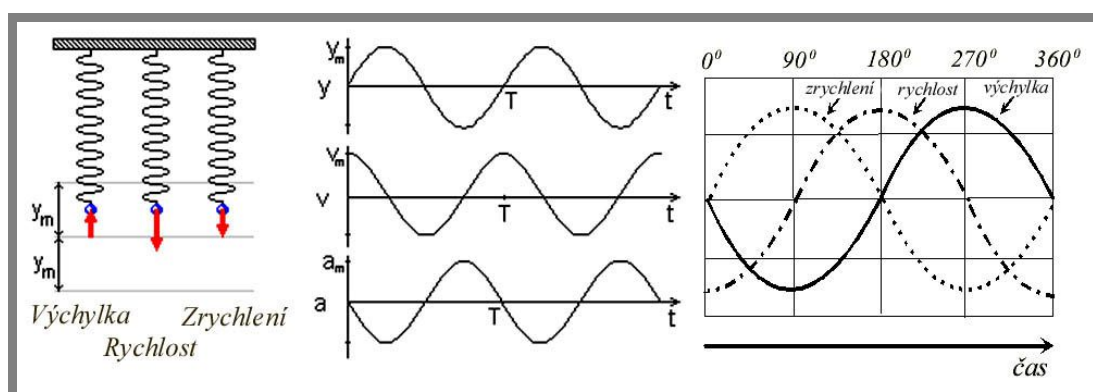
Mechanické vibrace jsou mechanickým kmitáním způsobeným externí nebo interní budící silou, při kterém hmotné body konají vratný pohyb kolem rovnovážné polohy, která je dána nulovými působícími silami. Na velikosti budící síly, jejím kmitočtu a směru závisí hodnoty veličin vibrací. Vibrace je možné popsat amplitudou a fází v daném časovém okamžiku (viz. ČSN ISO 2041 „Vibrace a rázy - Slovník“). Vibrace se skládají ze šesti pohybů, z 3 posuvů a z 3 rotací, v ortogonální systému souřadnic. V tělese nekmítají pouze diskrétní body nebo všechny body stejně, ale každý bod s různou výchylkou a fázovou rychlostí, a v prostředí vznikají postupné vlny. Mechanické vibrace jsou vybuzené jak přímočaře pohybujícími se a rotujícími částmi nebo tekutinami tak i rázy, které jsou způsobené střetem dvou navazujících částí a dochází ke změně gradientu veličin popisujících vibrace. Někdy se využívá generování umělých rázů diagnostickým kladívkem se zabudovanými senzory síly, které vypůsobí přechodový jev tvořící v tělese postupovou rázovou vlnu.

Vibrace úzce souvisí s technickým stavem stroje, se stavem jeho částí a jejich dynamickým namáháním. Vibrace můžou mít dle změn veličin v čase charakter jevu periodického, neperiodického nebo zcela náhodného. Periodické vibrace obsahující pouze jednu frekvenci jsou nazývané harmonickými vibracemi. U těchto vibrací stačí zjistit jednu z veličin mechanických vibrací a další potřebné veličiny lze dopočítat matematickými vztahy.

Fázový posun (fáze) je dán posunem dvou periodických veličin. U rotačních součástí se měří fáze vůči vztažnému bodu, např. na hřídeli, a slouží k lokalizaci poškození. Součtem různých časových průběhů vznikají složené vibrace neperiodické nebo periodické, které vzniknou složením harmonických vibrací, jejichž periody jsou v poměrech daných racionálními čísly.

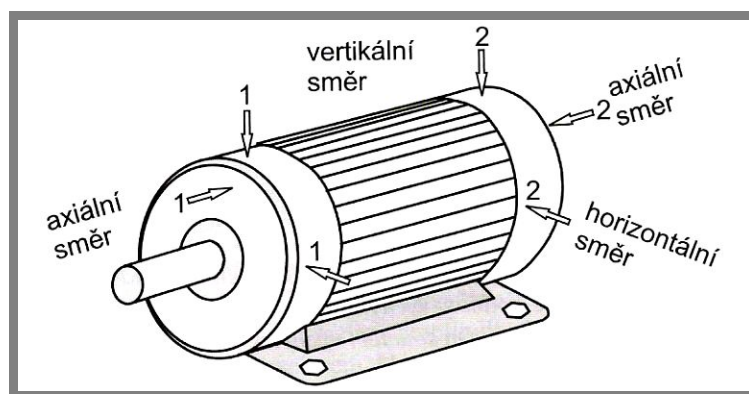
U strojů se vyskytuje superpozice složených vibrací a náhodných vibrací, tzv. šumu. Příkladem náhodných vibrací může být křídlo u letadla nebo lopatka turbíny při turbulenci. Šum je rušivým elementem signálu, který se odstraňuje pomocí filtrů, ty můžou být analogové nebo digitální.

Určujícími veličinami vibrací, které jsou také měřené pomocí snímačů, jsou: výchylka, rychlost a zrychlení.



Obr. 1.5-1 Určující veličiny vibrací [10]

Vyhodnocovací parametr, tj. měřená veličina, je volen podle typu stroje dle normy. Pro vibrační diagnostiku nejdůležitějšími normami jsou: ČSN ISO 13373-1 „Monitorování stavu a diagnostika – Monitorování stavu vibrací“ a ČSN ISO 10816-1 až 6 „Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech“.



Obr. 1.5-2 Základní směry pro měření celkových vibrací [1]

1.5.2

1.5.2 Snímače

Snímače, nazývané taky senzory, se dělí na absolutní a relativní. Absolutní senzory snímají určující veličinu vibrací vůči gravitačnímu poli země, zatímco relativní senzory vůči vztažnému bodu.

Výběr snímače je dán normou a závisí na typu stroje. Pokud se valivé ložisko nachází v jedoucím vozidle, letadle, velkém motoru nebo ložiskové skříni a není k dispozici vhodný vztažný bod, je potřeba použít absolutní senzor, který měří veličinu k vlastní setrvačné soustavě. Relativní senzory jsou v současné době bezdotykové na bázi laseru s využitím Dopplerova jevu, tzv. LDVs – Laser Doppler Vibrometry, a jsou vhodné pro stanovení relativního pohybu částí stroje. Umístění snímačů je také stanovené normou a na Obr. 1.5-2 jsou zobrazené základní směry pro měření celkových vibrací. Pro stanovení přesné diagnózy se měření vibrací kombinuje s měřením provozních parametrů stroje.

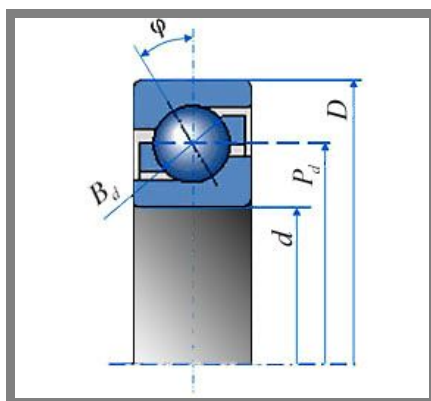
1.5.3 Zpracování a vyhodnocení vibrodiagnostického signálu

1.5.3.1 Celkové vibrace stroje

Vibrační energii měřenou v jistém frekvenčním rozsahu představují celkové vibrace. Porovnáním celkových vibrací s normou lze rychle stanovit technický stav stroje. Norma je dána měřeními stroje v bezporuchovém stavu. Směrnice pro měření celkových vibrací se nacházejí v normě ČSN ISO 10816. Tento přístup je levný, avšak neumožňuje stanovit přesnou příčinu vibrací a lokalizovat poškození. Diagnostická informace o poškození se ztrácí v šumu, který je způsoben vibracemi jiných částí stroje. Vliv vibrací z hlediska přenosu energie a jejich mohutnost nejlépe popisuje efektivní hodnota rychlosti.

1.5.3.2 Lokalizace poškození valivých ložisek

Poškození valivých ložisek odpovídá kmitočtové pásmo vysokých a velmi vysokých frekvencí. U ložiska je možné stanovit, na kterém komponentu se poškození nachází díky jejich charakteristickým frekvencím, tzv. chybovým frekvencím. Uvedené vzorce [dle 1] pro výpočet chybových frekvencí platí pro případ, že jsou známy rozměry ložiska dle Obr. 1.5-3 a počet valivých elementů n . Dále uvedené vzorce platí pro neotáčející se vnější kroužek. Pokud se vnější kroužek otáčí, je potřeba zaměnit znaménka $+$ na $-$ ve vzorcích všech komponent kromě valivého tělesa (3).



Obr. 1.5-3 Rozměry ložiska [10]

Frekvence závady vnějšího kroužku BPFO (Ball Pass Frequency – Outer Race) [1]:

$$f = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos j \right) \quad (1)$$

Frekvence závady vnitřního kroužku BPFI (Ball Pass Frequency – Inner Race) [1]:

$$f = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos j \right) \quad (2)$$

Frekvence závadě valivého tělesa BSF (Ball Spinn Frequency) [1]:

$$f = \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot f_r \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos j \right)^2 \right) \quad (3)$$

Frekvence závady klece kroužku FTF (Fundamentals Train Frequency) [1]:

$$f = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos j \right) \quad (4)$$

Přítomnost chybových frekvencí ve frekvenčním spektru neznamena, že je omezena funkce ložiska poškozením. Závažnost poškození určují postranní pásma, která se kolem této frekvence můžou vyskytovat. Jednotlivými výrobci jsou v tabulkách udávány hodnoty, které je pro získání chybové frekvence potřeba násobit konkrétní relativní frekvencí otáčení vnitřního a vnějšího kroužku valivého ložiska.

1.5.3.3 Fáze poškození

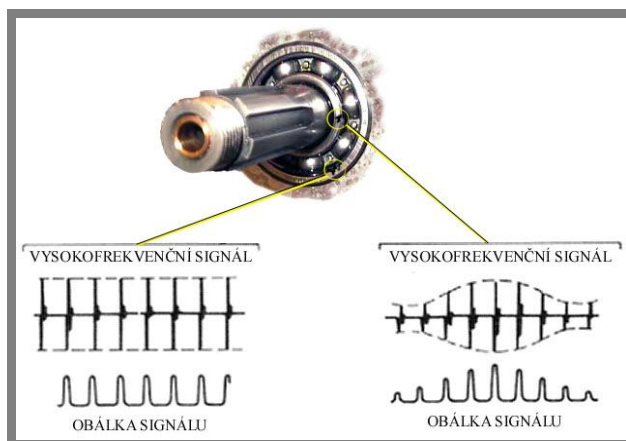
Poškození ložiska se dělí do 4 základních fází podle vývoje a závažnosti poškození.

První fáze poškození:

V první fázi dochází ke styku kov-kov a materiálem ložiska se šíří akustická emise, která může dosahovat několik MHz. Signál z piezoelektrického senzoru se pásmově filtruje v řádu 10^5 Hz a dále se zpracovává statisticky porovnáváním efektivních hodnot, středních hodnot, směrodatných odchylek aj. v průběhu provozu ložiska a sledují se trendy, které určují jak velký je nárůst poškození. Používá se také metoda SEE (Spectral Emitted Energy), která je patentována firmou SKF a umožňuje včasnou detekci problémů s mazáním.

Druhá fáze poškození:

V druhé fázi se projevuje poškození jednotlivých součástí ložiska. Ve spektru se vibrační složky nacházejí v oblasti nízkých kinematických frekvencí a jsou dosti překryté jinými spektrálními složkami, proto se v této fázi hodnotí poškození ve frekvenčním rozsahu 20 kHz – 60 kHz a používá se senzory zrychlení (akcelerometry) s vysokou vlastní frekvencí, která je vybudena při dopadu vln na senzor. Vibrace akcelerometru tvoří nosnou složku signálu amplitudově modulovaného signálu, přitom modulační složka je tvořena poškozením součástí ložiska. Podle amplitudové modulace je možné poznat, zda se poškození nachází na vnějším nebo vnitřním kroužku (viz. Obr. 1.5-4).

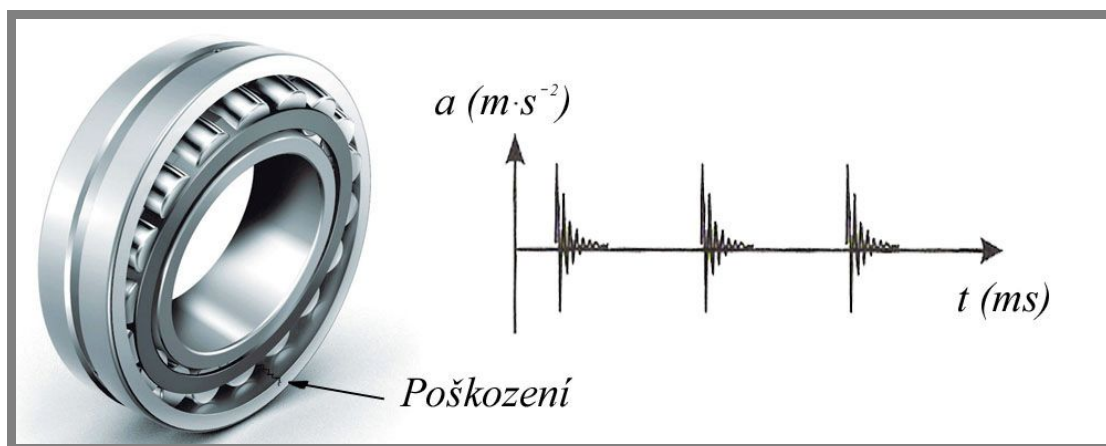


Obr. 1.5-4 Amplitudové modulace [10]

Při zpracování signálu z akcelerometru se nejdříve odstraní širokopásmovým filtrem nízkofrekvenční vibrační složky, které souvisí s jinými částmi stroje. Dále je možné signál zpracovávat mnoha způsoby. Jednou z možností je metoda SE (Spike Energy) založená na zpracování signálu na základě rozkmitu rázového impulsu, přičemž energie rázových impulsů je funkcí jejich rozkmitu. Jednotkou je gSE, ta vychází ze tří veličin: střední hodnoty zrychlení v pásmu 5 – 50 kHz, frekvence pulzů a výkmitu zrychlení pulzů. Pro tuto druhou fázi bývá tato hodnota přibližně 0,25 gSE. Dalším způsobem je HFD (High Frequency Detection), kterým se vyhodnocuje efektivní a špičková hodnota signálu v pásmu od 5 kHz do 60 kHz. Dále existuje metoda BCU (Bearing Condition Unit) patentovaná firmou Schenk. Podstatou je vybudování kmitání ve snímači v rezonanční oblasti 36 – 38 kHz. Sleduje se odezvu, četnost rázů a vnitřní energie. Z těchto údajů vyplývá hodnota BCU. Tato hodnota závisí velmi na rozměrech valivého ložiska. Firma SPM používá metodu SPM (Shock Pulse metod), která vyhodnocuje absolutní velikosti impulsů a měří střední hodnoty amplitudy kmitání snímače v rezonanční oblasti 30 – 40 kHz. Pro tuto metodu je však důležité znát přesné rozměry ložiska a je potřebná instalace měřících míst. Nejběžnější metodou je obálková analýza, která se používá také pro následující fázi. Všechny tyto metody jsou citlivé na ostré impulzy se širokým spektrem signálu, a proto jsou vhodné pro detekci mikrotrhlin.

Třetí fáze poškození:

Pro tuto fázi se používají běžné akcelerometry. Dochází ke vzniku mechanických rázů, které jsou způsobeny stykem poškozeného prvku s ostatními. Tyto rázy se šíří tělesem ložiska a rozkmitají ho na jeho vlastní frekvenci v rozmezí 5 kHz až 20 kHz. Tyto kmity jsou však tlumené a rychle dozívají. Jejich zobrazení je na Obr. 1.5-5. S rostoucím opotřebením je se nachází ve frekvenčním spektru více harmonických složek ložiskové frekvence a přibývá počet postranních pásem. Hodnota gSE v této fázi bývá v rozmezí 0,25 – 0,5 gSE a s rostoucím počtem postranních pásem u spektrálních složek rezonance se blíží k 1 gSE.



Obr. 1.5-5 Projev poškození získaný obálkou signálu zrychlení [10, 12]

Čtvrtá fáze poškození:

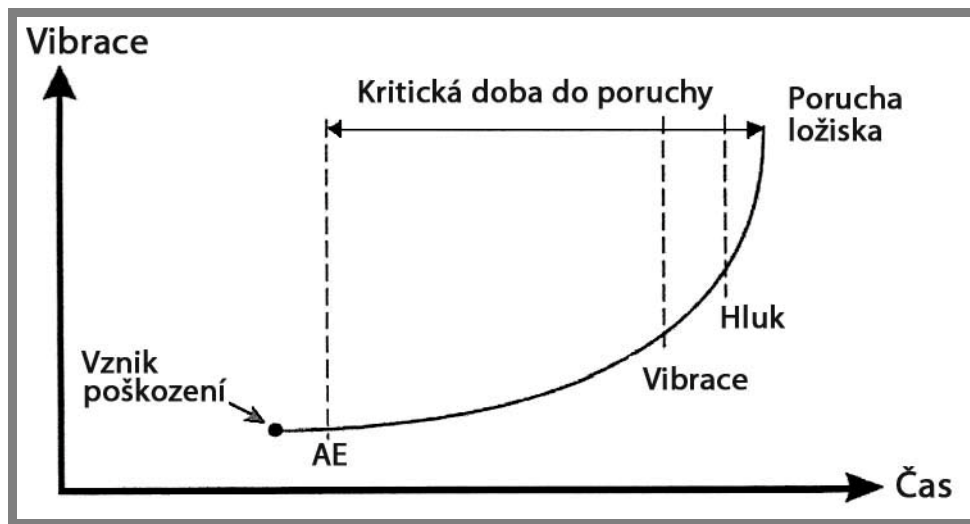
Tato fáze je již kritická, poškození součástí ložiska je velmi závažné, vibrační spektrální složky přecházejí do oblasti nízkých kmitočtů a otáčkové spektrální složky narůstají. Diskrétní frekvence poškození a vlastní frekvence ložiska začínají zanikat

v širokopásmovém frekvenčním šumu. Po dosažení této fáze zbývá maximálně 1% L_{10} , což jsou řádově hodiny (viz. [1], [9], [10]).

1.6

1.6 Akustická emise

Tato diagnostická metoda je novým trendem v oblasti diagnostiky ložisek, umožňuje sledovat poškození ložisek v dřívějších fázích, ale je zároveň náročnější na zpracování signálu kvůli vyšší úrovni šumu. V literatuře se pro diagnostickou metodu akustické emise používá často zkratka AE.



Obr. 1.6-1 Schopnost detekce poškození ložisek metodou AE a vibrační diagnostikou [14]

1.6.1

1.6.1 Popis metody

Touto metodou je možné detekovat velmi malé energeticky ztrátové procesy, jakými jsou tření, kavitace a styk částí valivých ložisek. Akustická emise vzniká při nevratných dislokačních a degradačních procesech v makrostruktuře i mikrostruktuře materiálu. Při těchto dějích se uvolňuje energie, která se přemění na mechanický napěťový impuls šířící se materiálem jako příčná nebo podélná elastická napěťová vlna, která při dopadu na rozhraní tělesa a vzduchu se částečně odrazí a částečně se transformuje a dále se šíří povrchovou vlnou nazývanou Rayleighovou, přičemž dochází také k částečné transformaci na Lambovy deskové vlny.

Energie vln je velmi malá, proto je potřebné použití velmi citlivých snímačů. Jsou používány piezoelektrické senzory, které jsou citlivé na dislokace v materiálu v řádech 10^{-14} m. Kolmá složka vlny se detekuje širokopásmovými piezoelektrickými senzory s frekvenčním pásmem od 100 kHz do 4 MHz, které mají rezonanční frekvenci nad měřeným rozsahem, nebo rezonanční senzory s více rezonancemi a nastavitelnou citlivostí v závislosti na frekvenci pro užší měřená pásma. Aby bylo zabráněno ztrátám diagnostické informace a rušivým jevům, je potřebné mezi senzor a povrch tělesa nanést vrstvu oleje, vazelíny nebo speciální suspenze.

Akustická emise je využívána pro lokalizaci míst, kde vznikají a šíří se poškození. Tato metoda je zvláště výhodná pro kontinuální diagnostiku valivých ložisek a její výhodou je časová úspora oproti jiným metodám. Dosud však není známa úplně příčina vzniku energie akustické emise, neboť tento jev je spojen s mnoha dalšími

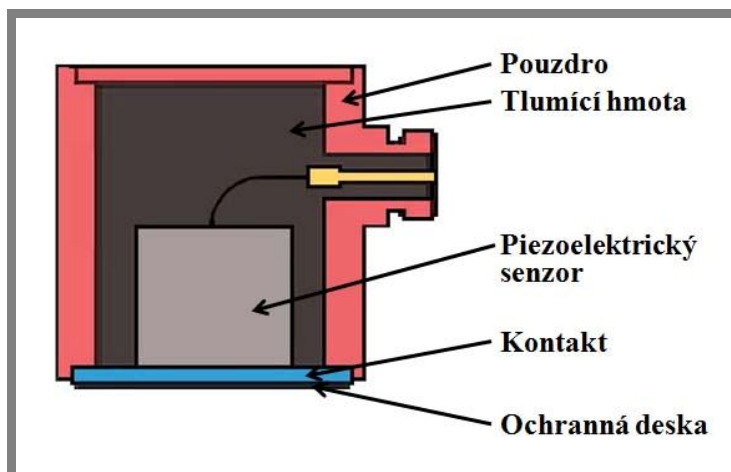
faktory, kterými jsou přenos vlny, který je dán strukturou a homogenitou použitých materiálů, tvar a povrch tělesa.

Akustická emise se dělí na nespojitou (impulzní) a spojitou. Nespojitou akustickou emisi způsobují děje, které jsou velmi krátké v řádu nanosekund. Její signál má charakter tlumených kmitů. Nespojitá akustická emise je typická pro vznik a šíření trhlin.

1.6.2 Snímače

V běžných aplikacích se snímají napět'ové vlny akustické emise ve frekvenčním pásmu od 20 kHz do 2 MHz. Používají se nejčastěji piezoelektrické snímače, jejich konstrukcí je pak dáno, ve které oblasti frekvenčního pásma jsou citlivější. Podle snímané veličiny se dělí na akcelerometry a tlakové snímače. Novější snímače mají v sobě zabudovaný předzesilovač, který signál zesílí a minimalizuje tak ztráty diagnostické informace. Citlivými snímači je možné detekovat dislokace v materiálu až do řádu 10^{-14} m. Příklad konstrukce piezoelektrického snímače je uveden na Obr. 1.6-2. Dalšími používanými typy jsou snímače kapacitní, elektromagnetické, tenzometrické, mechanické, rezonanční, laserové, aj. [1, 18]

1.6.2



Obr. 1.6-2 Piezoelektrický snímač akustické emise [19]

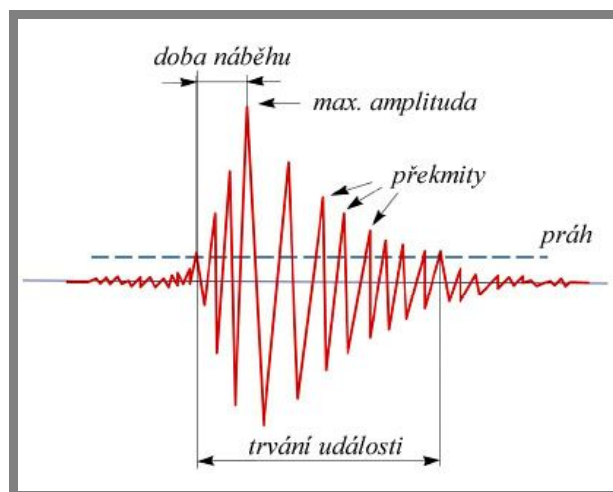
1.6.3 Zpracování a vyhodnocení signálu AE

Zpracování signálu akustické emise je mnohem náročnější na zpracování než signál vibrační diagnostiky, jelikož snímaná energie napět'ových vln je velmi malá, proto je potřeba použít velmi citlivé snímače, tím je dána celkově větší náchylnost měřící trasy na elektromagnetické rušení. Frekvence snímaných vln akustické emise se pohybuje až do řádu Mhz, proto je potřeba při delší kabeláži signál dostatečně zesílit, jelikož útlum narůstá s frekvencí. Vyšší snímané frekvence také vyžadují vyšší vzorkovací frekvenci, čímž podstatně narůstá objem zaznamenaných dat. Nejčastěji se signál zpracovává FFT transformací s obdélníkovým okénkem nebo waveletovou transformací, která je schopna velmi účinně potlačením nízkofrekvenčních složek odfiltrout šum.

Hodnocené parametry impulzního signálu jsou uvedeny na Obr. 1.6-3, patří k nim počet událostí za daný časový interval, četnost překmitu přes zvolenou úroveň (counts), amplituda signálu, doba trvání události, energie impulzu, aj. Spojitou akustickou emisi vyvolávají děje, které nejsou časově oddělené a její signál

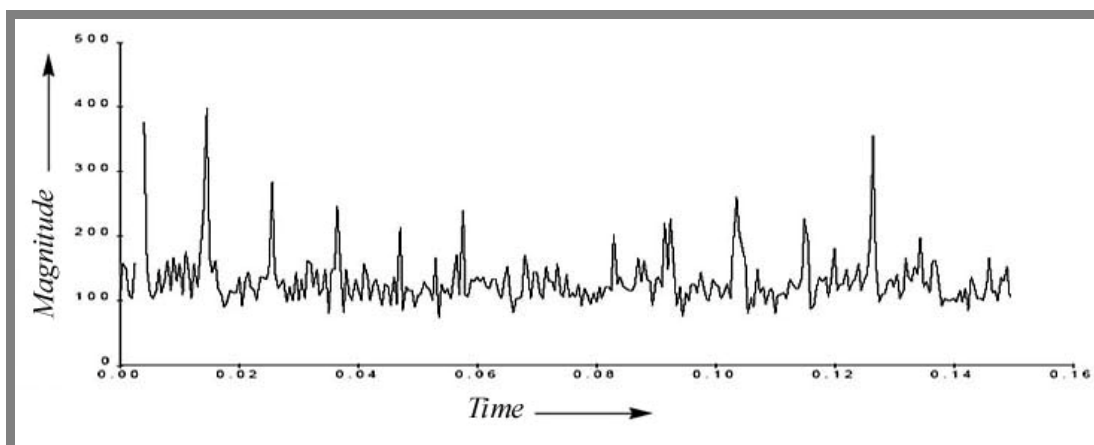
1.6.3

delší dobu neklesá pod pevně nastavený nebo pohyblivý práh, který se může automaticky měnit v závislosti na střední hodnotě nebo dle úrovně šumu. Použitím pohyblivého prahu lze zmenšit závislost naměřených hodnot na provozních parametrech. To umožňuje provést srovnávací měření bez nutnosti zajištění stejných provozních a okolních podmínek, jak u předchozích měření. Hodnocené parametry spojitého signálu se vyhodnocuje jako střední parametry z daného časového úseku. Mezi nejčastěji hodnocené patří střední efektivní hodnota RMS a střední úroveň absolutní hodnoty úrovně signálu ASL.



Obr. 1.6-3 Hodnocené parametry impulzního signálu [15]

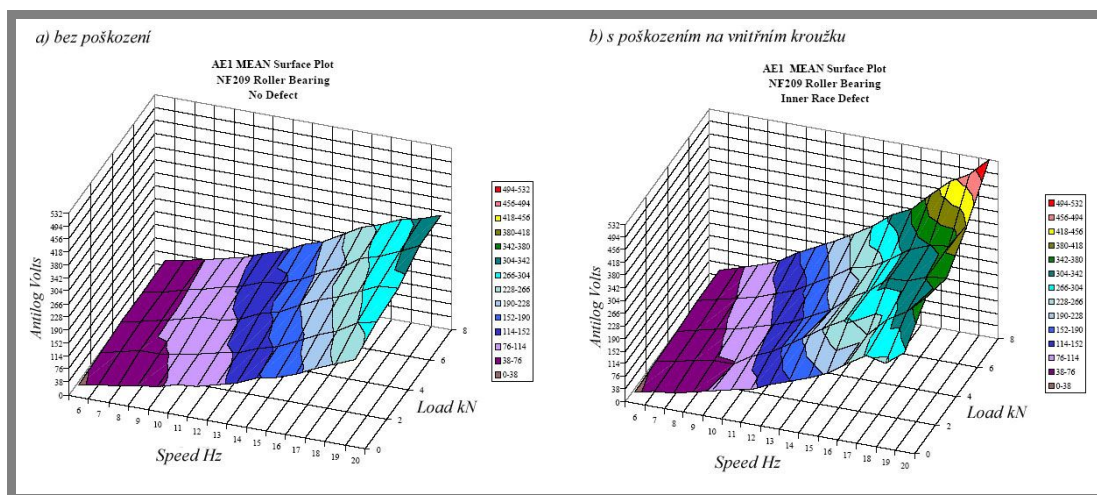
Na Obr. 1.6-4 je uveden příklad vznikající akustické emise při styku povrchů valivého tělesa a vnitřního kroužku. Izolované pulzy vznikají, když se poškozený povrch stýká s jiným povrchem.



Obr. 1.6-4 Zobrazení akustické emise při styku valivého tělesa s vnitřním kroužkem [17]

Na Obr. 1.6-5 jsou plochy zobrazující závislost mezi střední hodnotou akustické emise, rychlostí otáčení a zatížením. Pokud není přítomné poškození, je tato plocha jednoduchá. Jestliže je v součásti poškození, přesouvá se tato plocha k vyšším hodnotám a tvoří složitější reliéf. Z grafů lze také vidět, že velikost střední hodnoty signálu není citlivá na přítomnost poškození při malých rychlostech. Pro přesnější určení technického stavu stroje je vhodné sledovat střední hodnotu a kontinuálně

srovnávat její aktuální hodnoty s předchozími při stejných provozních podmínkách [1, 16, 17].

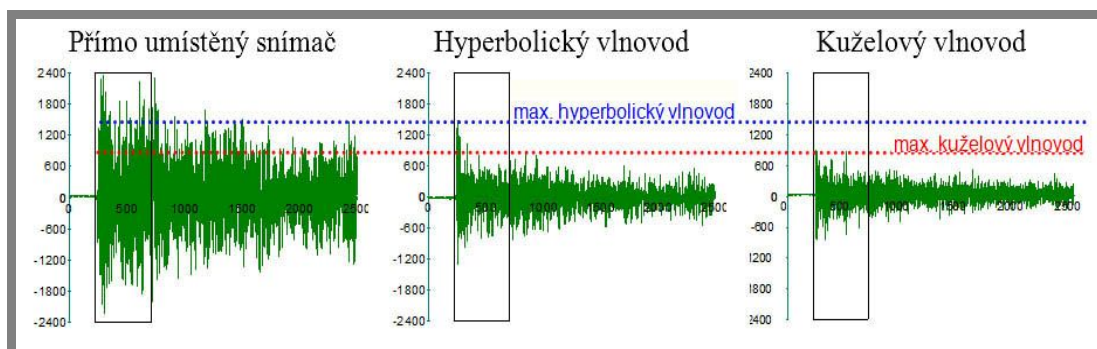


Obr. 1.6-5 Vliv rychlosti a zatížení na velikost akustické emise valivého ložiska [17]

1.7 Vlnovody

Ideální je, aby byl snímač umístěn přímo na součásti, která je předmětem diagnostického měření, to však v praxi konstrukce zařízení nebo teplota povrchu často nedovoluje, proto je nutné použít vlnovod, který zajistí přenos vlny obsahující diagnostickou informaci ze součásti do snímače. Vlnovod má svůj specifický tvar, běžně se skládá z užší válcovité části, která se dotýká součásti a prochází konstrukcí zařízení, poté se rozšiřuje nejlépe dle křivky útlumu, tj. hyperbolicky, do požadovaného rozměru snímače, který se na něj upevní lepením, magneticky, převlečnou maticí, speciální konstrukcí nebo může být přímo součástí pouzdra snímače. V praxi se však často s ohledem na výrobu používá kuželovité rozšíření tvaru. Z měření vyplývá, že toto zjednodušení tvaru nevede k výraznému nárůstu útlumu. Aby byl minimalizován útlum na přechodových plochách mezi součástí a vlnovodem a mezi snímačem a vlnovodem, aplikuje se vazelína. S délkou vlnovodu útlum narůstá, stejně tak, pokud se dotýká jiné části stroje [20].

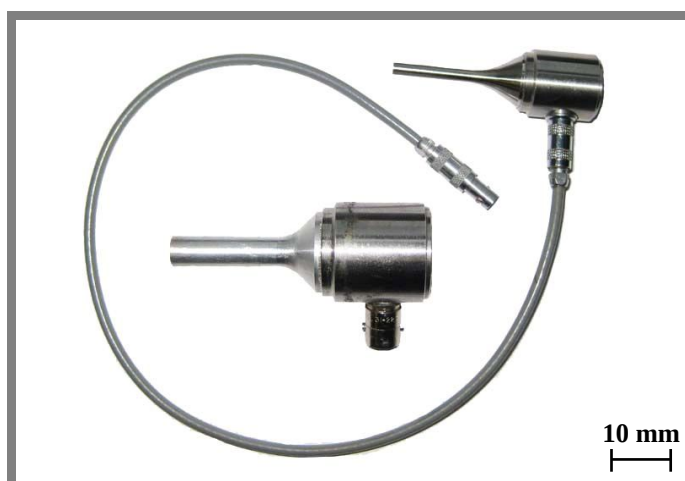
1.7



Obr. 1.7-1 Porovnání intenzity signálu (mV, μ s) [21]



Obr. 1.7-2 Vlnovody – hyperbolické a kuželové [21]



Obr. 1.7-3 Snímač s integrovaným vlnovodem

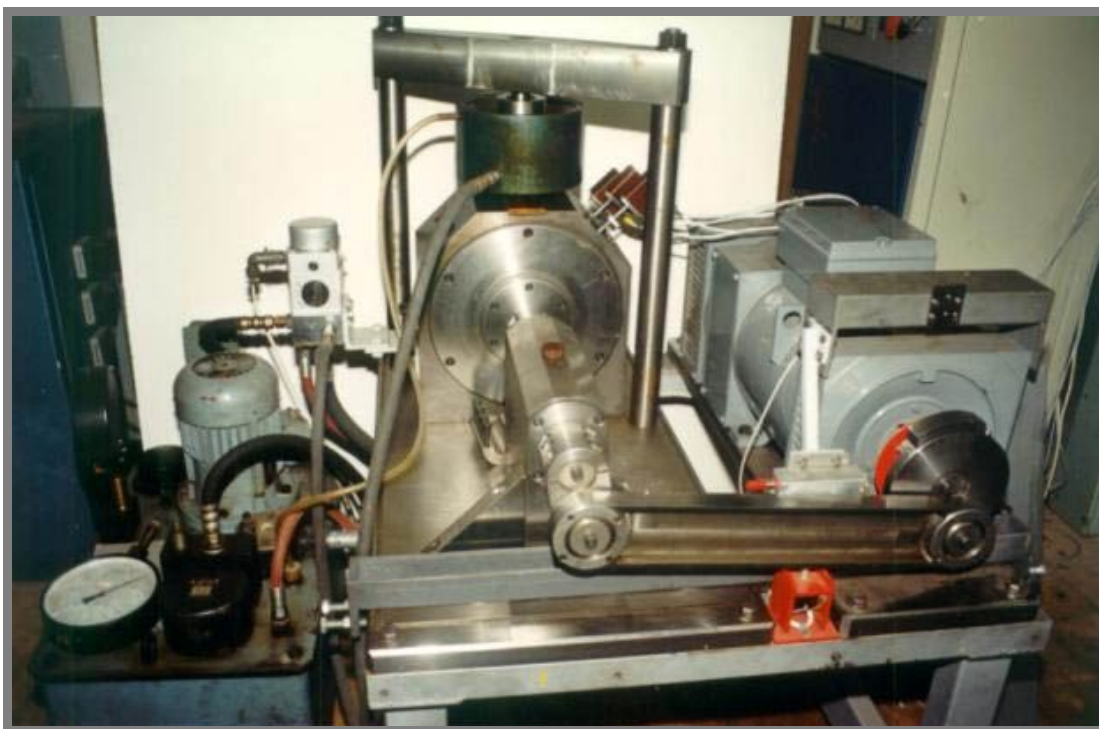


Obr. 1.7-4 Speciální uchycení vlnovodu [21]

1.8 Zkušební zařízení ložisek

1.8

Nejdůležitější zkouškou pro ověření technických vlastností ložisek je zkouška trvanlivosti ložisek. Při této zkoušce se ověřuje, zda parametry ložisek, jako dynamická únosnost aj. odpovídají katalogovým údajům. Tyto zkoušky se však používají také při vývoji nových ložisek nebo nových diagnostických metod. Na některých zařízeních, tj. pokud mají snímač teploty a jsou schopny dosáhnout požadované mezní frekvence, je možné také testovat mezní frekvenci otáčení. Touto zkouškou se zjistí, při jakých maximálních otáčkách je ložisko schopné bezporuchového provozu. Zkušební zařízení trvanlivosti ložisek lze rozdělit dle typu ložiska na radiální nebo axiální nebo dle typu zatěžování konstantní nebo cyklické. Dále také existují jednoúčelové stroje pro vyhodnocení vlastností krytých ložisek. Součástí vývoje a výroby je také metrologické prověřování geometrických a rozměrových tolerancí a metalografické zkoušení vlastností ložiskových materiálů. Cílem při konstrukci zkušebních zařízení ložisek pro zkoušky trvanlivosti je, aby zařízení mělo co nejjednodušší konstrukci, aby se ve snímaném diagnostickém signálu jednotlivé součásti zařízení, které nejsou předmětem diagnostikování, projevovaly co nejméně [22, 23].



Obr. 1.8-1 ZKL - Zkušební zařízení trvanlivosti radiálních ložisek s cyklickým zatěžováním [24]

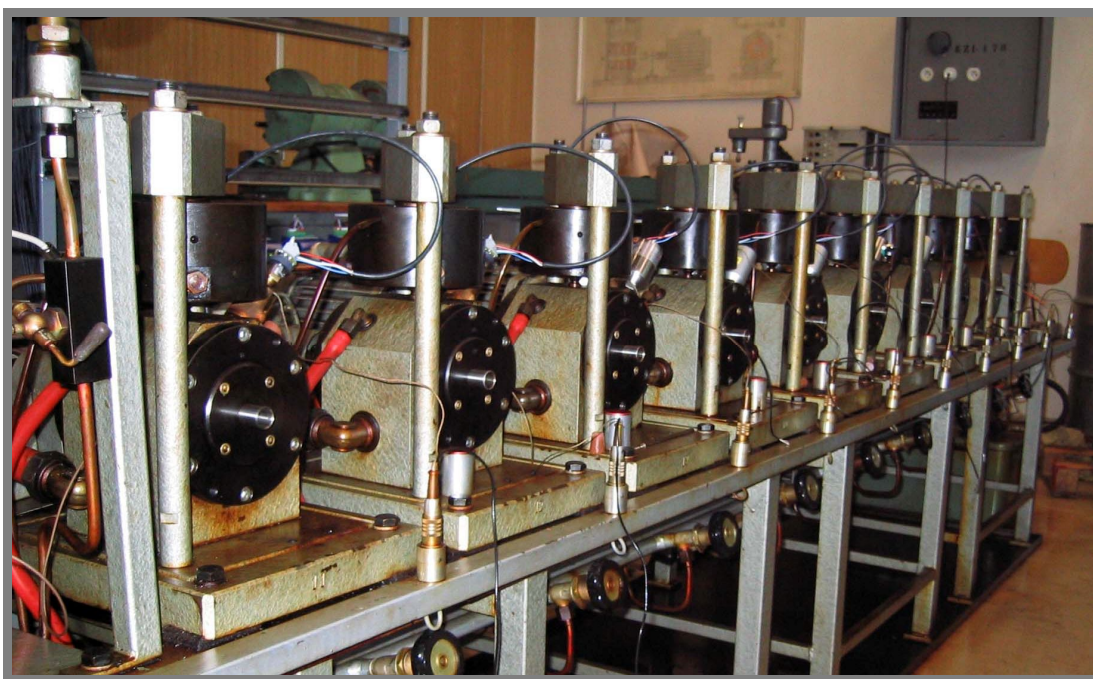


Obr. 1.8-2 ZKL - Zkušební zařízení trvanlivosti radiálních ložisek s konstantním zatěžováním [25]

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

2

Na Ústavu konstruování VUT v Brně se nachází zkušebna ložisek, jejíž součástí je 20 experimentálních zařízení SA67 pro zkoušky trvanlivosti ložisek. Tyto zařízení využívají k detekci poškození pouze metodu vibrační diagnostiky. Ke spuštění a vypnutí zkušebních zařízení slouží řídicí panel, na kterém se nastaví odhadnutá hodnota vibrací, při které se zkušební zařízení zastaví. Tento přístup zjišťování trvanlivosti ložisek je velice nepřesný a nespolehlivý, není možné tímto způsobem dostatečně popsat a sledovat vznik a vývoj poškození. Není také možné získat nějaký výstup v podobě digitálního záznamu signálu, který by bylo možné dále zpracovávat a analyzovat.



Obr. 2-1 Zkušební stanice SA67

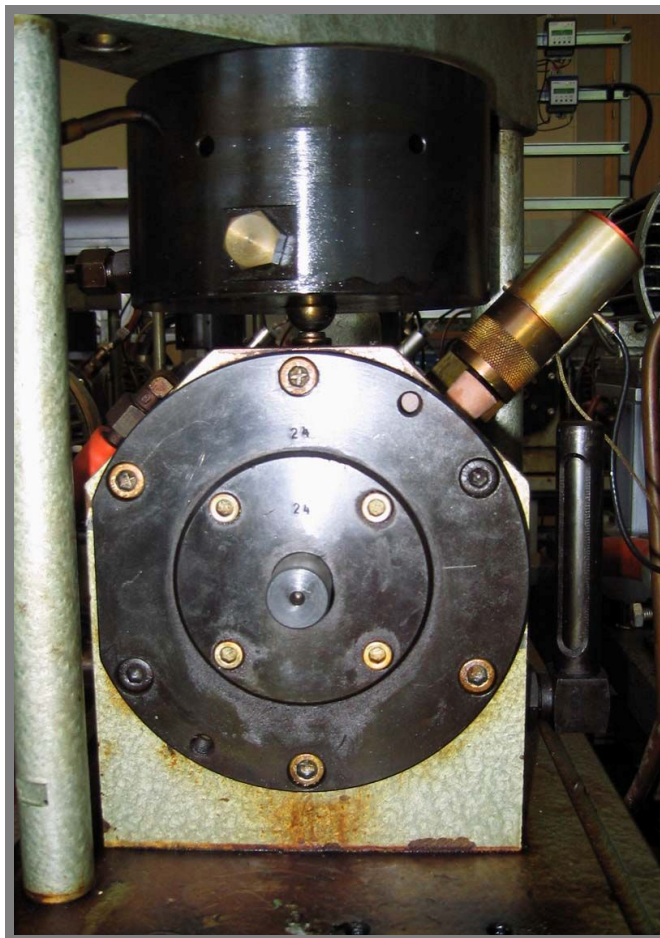
2.1 Popis zkušebního zařízení ložisek SA67

2.1

Zkušební zařízení SA67 je využíváno pro zkoušky trvanlivosti ložisek, zjišťuje se doba provozu ložiska do vzniku první kontaktní únavy. Jednotlivé stanice jsou spouštěny a vypínány řídicím panelem, na kterém je možné nastavit mezní vibrace nebo teplotu, při které se stanice vypne [26].

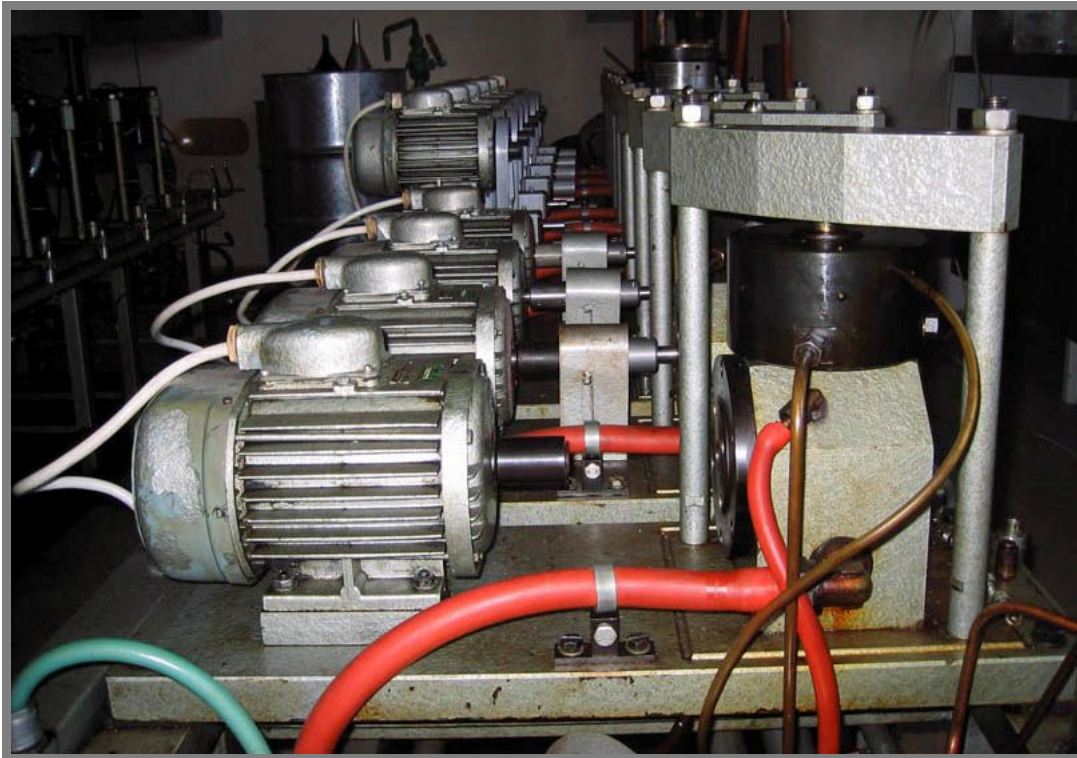
Ve zkušebně je umístěno celkem 20 zkušebních stanic a dva řídicí panely. Každý panel řídí 10 stanic. Zkušební stanice jsou umístěny vedle sebe ve dvou řadách po deseti a upevněné šrouby ke společnému rámu, pod kterým se nachází odtokové vany pro zachycení případného úniku maziva. Výhodou tohoto rozložení je, že jsou stanice přístupné zepředu i zezadu a je tak možné snadněji provádět potřebné technické práce, ke kterým patří především výměna testovaného ložiska, při kterém je nutno odpojit snímač a vytáhnout ho ze zařízení, poté demontovat čelní víko, tyto úkony lze provádět pohodlně zepředu, s ohledem na konstrukci zařízení je však

odpojení hřídele od elektromotoru pohodlnější ze zadní strany stanice. Přístup ze dvou stran je také výhodou při provádění úprav zařízení.

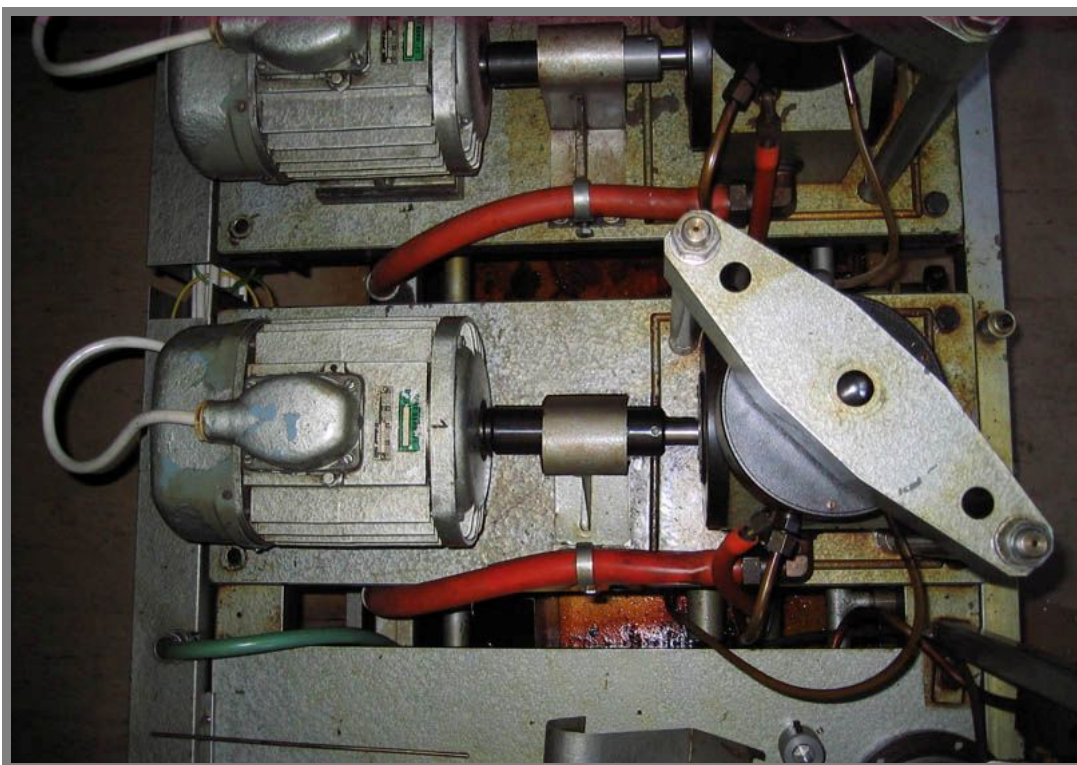


Obr. 2.1-1 Zkušební stanice SA67 – pohled zepředu

Jednotlivé stanice jsou napojeny na centrální systém mazání, který zajišťuje přítok požadovaného maziva, pokud se provádí zkouška v olejové lázni. K rámu je také upevněná kabeláž pro přívod elektrického proudu k jednotlivým stanicím a kabeláž snímačů tak, že je u každé stanice konektor pro připojení snímače. Stanice jsou také připojené k potrubí s tlakovou kapalinou pro hydraulický válec, který zatěžuje testované ložisko.

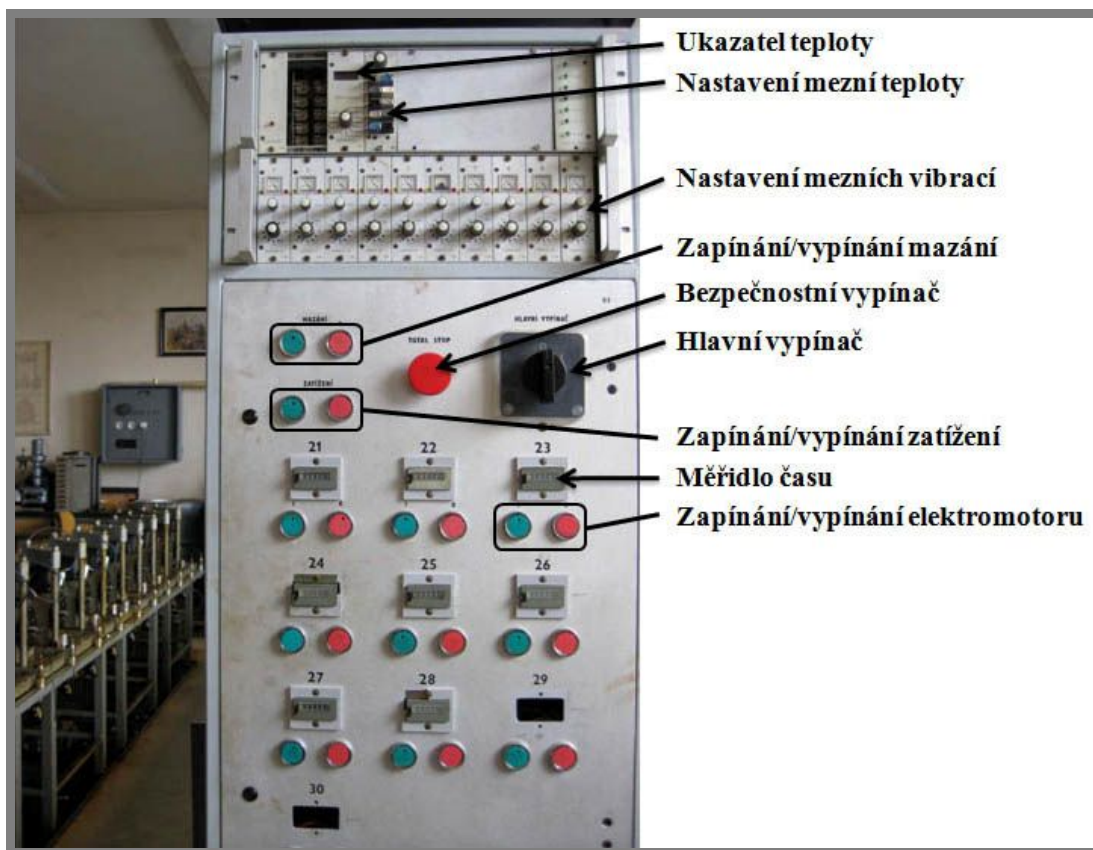


Obr. 2.1-2 Zkušební stanice SA67 – pohled zleva



Obr. 2.1-3 Zkušební stanice SA67 – pohled shora

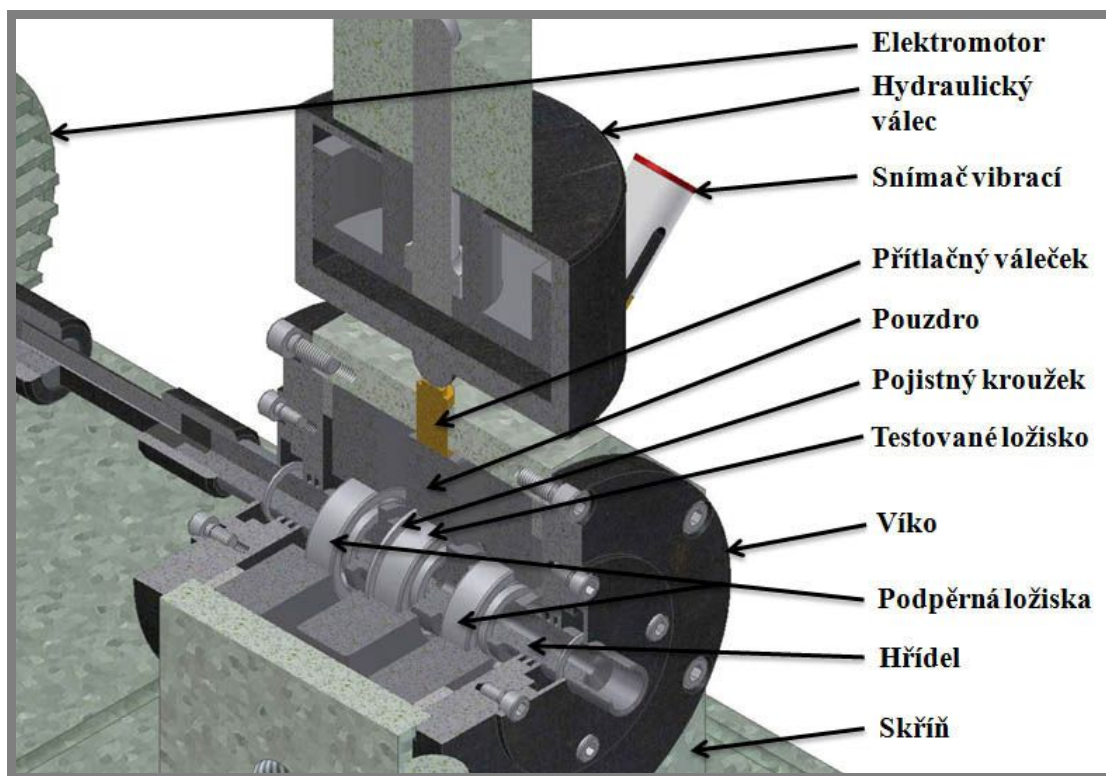
Řídicí panel je zobrazen a popsán na Obr. 2.1-4. Na panelu se nachází hlavní vypínač a bezpečnostní vypínač, kterým je možné zastavit všechny stanice v dané řadě. Dále se na panelu nachází vypínání a zapínání zatížení, které je řešené hydraulicky, mazání, které je zajištěno oběhovým čerpadlem a elektromotorem. Součástí panelu je také 6-ti číslicové měřidlo času, které zaznamenává dobu provozu ložiska v minutách do dosažení mezních vibrací nebo teploty. Mezní teplota měřená snímačem se nastavuje v horní části panelu, pro všechny stanice v dané řadě je stejná. Na ukazateli teploty je pak možné zobrazit aktuální teploty na vybrané stanici. Vibrace jsou nastavovány pro každou stanici zvlášť na základě zkušeností z předchozích měření a přepokládáné velikosti vibrací. Po dosažení mezních vibrací se stanice vypne, je však možné hodnotu mezních vibrací navýšit a stanice je znovu uvedena do provozu. Z řídicího panelu není žádný výstup, který by umožňoval záznam vibrací a tím sledování vývoje poškození v ložiscích. Je možné pouze určit dobu, po kterou bylo testované ložisko při daném zatížení, otáčkách a mazání v provozu.



Obr. 2.1-4 Řídicí panel

Stanice se skládá ze skříně, ve které se nachází testované ložisko a podpěrná ložiska v pouzdrech. Pootočení pouzder brání kolík, který prochází pouzdry a je zasunut z obou stran do vík. Ložiska jsou rozmístěné na hřídeli a zajištěné pojistnými kroužky. Testované ložisko je uprostřed a pouzdro, ve kterém je uloženo, se nedotýká skříně, jako pouzdra podpěrných ložisek. Pouzdra ložisek jsou v současné době upravena pro uložení ložisek typu 6204. Je však možné pouzdra upravit pro jiné typy ložisek, přitom je ale potřeba přizpůsobit rozměry hřídele, pouzder a event. vík rozměrům ložiska.

Nad skříní se nachází hydraulický válec upevněný ke konstrukci zařízení, který přes přítlačný váleček, který se dotýká pouzdra testovaného ložiska, působí definovanou radiální silou na ložisko. Zatěžovací síla je na tomto typu zařízení konstantní a je určena tlakem v kapalině, který je zobrazen na manometru, který ukazuje hydraulický tlak v dané řadě deseti stanic. Vyvolané zatížení je tak pro všechny stanice v řadě stejné. Pomocí ventilu, který se nachází u každé stanice lze však hydraulický válec stanice odpojit, toho se využívá v případě provádění úprav nebo údržby dané stanice. Popis stanice je zobrazen na Obr. 2.1-5. Čelní a zadní strana skříně je zakrytována víky, ve kterých jsou lamelová těsnění a pryžová těsnění, které se vkládají pouze, pokud se provádí zkouška v olejové lázni. Hřídel je spojená s elektromotorem tenkým ocelovým plechem, který se v případě poruchy a zadření ložiska deformuje a odpojí hřídel od elektromotoru, aby nedošlo k jeho poškození. Elektromotory jsou trojfázové o výkonu 1100 W s 2845 ot./min, šest z nich je s převodem do rychla. Ve skříní jsou také 2 otvory pro přívod a odtok maziva, 1 otvor pro olejoměr ukazující hladinu oleje ve skříní a 3 otvory umožňující umístit snímač na testované nebo podpěrné ložiska.



Obr. 2.1-5 Popis zařízení

Snímač vibrací je zobrazen na Obr. 2.1-6, funguje na principu elektromagnetické indukce, kdy pohyb magnetu vyvolaný mechanickými vibracemi indukuje napětí. Součástí snímače je taky měřidlo teploty, které je taktéž připojeno k řídicímu panelu. Snímač má vlastní vlnovod, který je uchycen k vlastnímu pouzdru snímače přes pružinu, která po vložení snímače do skříně zajišťuje pro každé měření stejný přítlak konce vlnovodu na povrch vnějšího kroužku ložiska. To je důležité, pokud se porovnávají výsledné hodnoty měření různých ložisek.



Obr. 2.1-6 Snímač vibrací

2.1.1

2.1.1 Typy prováděných zkoušek

Na zkušebním zařízení SA67 se provádějí především zkrácené zkoušky trvanlivosti, které se vyznačují především přetížením nebo nedostatkem maziva. Jsou takto simulovány extrémní provozní podmínky, které mohou v praxi nastat. Hlavním účelem zkoušek je srovnávání parametrů ložisek různých výrobců. Na zařízení by bylo také možné zkoušet kvalitu olejů nebo emulzí. V současné době je zařízení přizpůsobeno pro zkoušky ložisek typu 6204.

Pro ověření diagnostických metod a nastavení měřicího systému se provádějí zkoušky na sucho, tj. bez maziva, tyto zkoušky trvají pouze několik minut, nebo zkoušky s omezeným mazáním, kdy se ložisko vymyje a namaže konzervačním olejem, které trvají v řádu několika hodin. Pro srovnání parametrů ložisek se provádí zkrácené zkoušky trvanlivosti ložisek s vlastní náplní.

Rozdělení zkoušek dle podmínek mazání:

- na sucho (bez maziva)
- s omezeným mazáním (s konzervačním olejem)
- s vlastní náplní
- v olejové lázni

2.2

2.2 Diagnostické prostředky DAKEL

Pro aplikaci metody akustické emise na zkušebním zařízení SA67 je možné využít diagnostické prostředky DAKEL.

V laboratořích ústavu konstruování jsou k dispozici dva analyzátoři DAKEL – XEDO. Analyzátor DAKEL – XEDO se skládá z boxu, do kterého je možné umístit

různé měřicí a komunikační karty. Analyzátoři, které jsou v laboratoři k dispozici, obsahují komunikační jednotku XEDO-FE umožňující připojení systému k PC prostřednictvím standardního komunikačního rozhraní (ethernet) a následné zpracování pomocí softwaru DAKEL Daemon. Boxy obsahují také jednotky pro vyhodnocování parametrů akustické emise XEDO-AE umožňující připojení snímačů DAKEL. Tyto jednotky dokážou zpracovat emisní události a umožňují také přímé digitální vzorkování emisních signálů frekvencí až 8 MHz. Jeden analyzátor má dvě měřicí jednotky a druhý čtyři. Každá měřicí jednotka umožňuje připojení jednoho snímače AE. Každá jednotka obsahuje 16 bitový digitální signálový procesor, řídicí program je uložen v paměti ROM umístěné přímo na desce jednotky, je možné ho updatovat [27]. Analyzátor se dvěma měřicími jednotkami a jednou komunikační kartou je na Obr. 2.2-1.



Obr. 2.2-1 Analyzátor DAKEL – XEDO

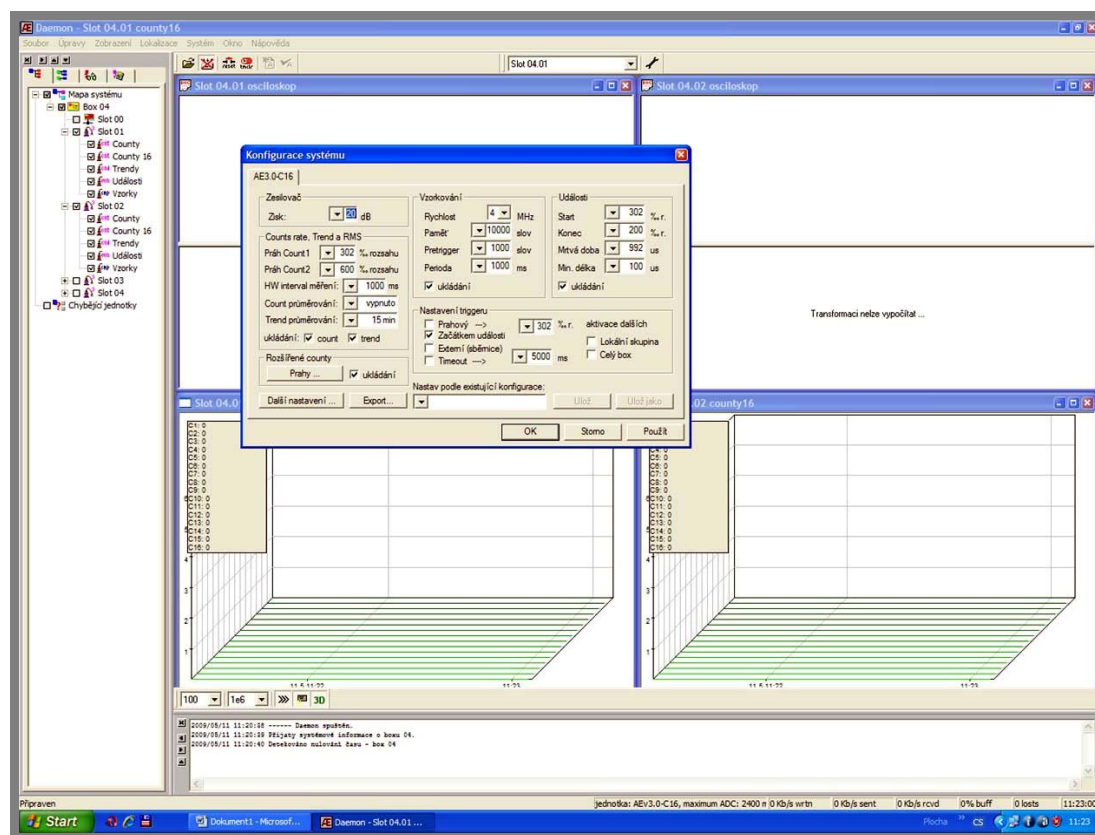
Firma DAKEL nabízí komplexní řešení pro měření akustické emise, jehož součástí jsou také snímače. Dělí se především na aktivní se zabudovaným předzesilovačem a pasivní bez předzesilovače. Liší se především geometrickými rozměry piezoelementu a typem pouzdra snímače, od kterých se odvíjí výsledná přenosová charakteristika. Při frekvencích nad 1 MHz závisí přenosová charakteristika také na vlastnostech a délce použitého koaxiálního kabelu, kterým se připojuje snímač k měřicí jednotce. Snímače DAKEL je možné použít do frekvence 2,8 MHz. Snímače je také možné rozdělit dle způsobu jejich uchycení: přímým lepením na plochu, s magnetickým držákem nebo převlečnou maticí na vlnovodu (viz. [28]).



Obr. 2.2-2 Sortiment snímačů DADEL [28]

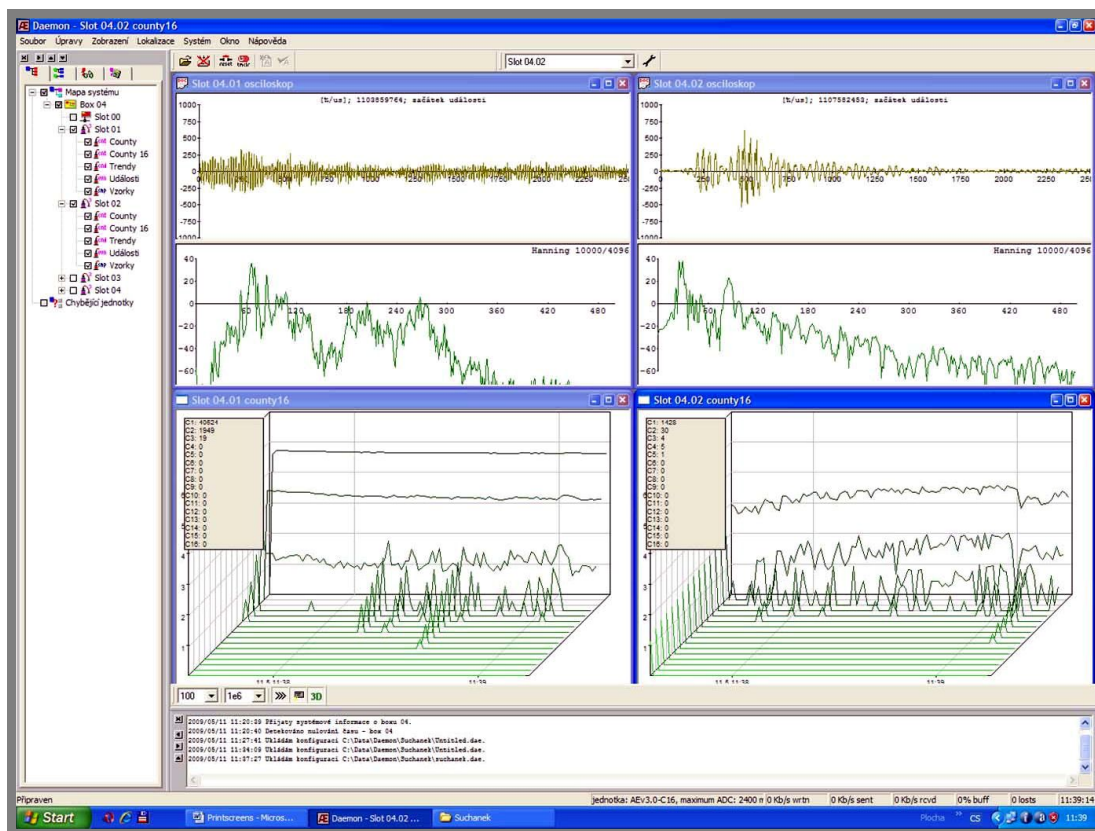
Řídící program na PC umožňuje konfiguraci systému a provádět měření včetně záznamu, který je možné dále zpracovávat a archivovat, tento program běží na standardní platformě OS Windows a je univerzální pro všechny typy měřicích jednotek DADEL [27].

Před vlastním měřením se provádí konfigurace systému, pro každou jednotku (slot) zvlášť se nastavuje především zesílení signálu ze snímače, vzorkovací frekvenci, hladiny (prahy), záznam události a trendů (Obr. 2.2-3). Konfigurace je možné uložit do souboru a použít pro další měření.



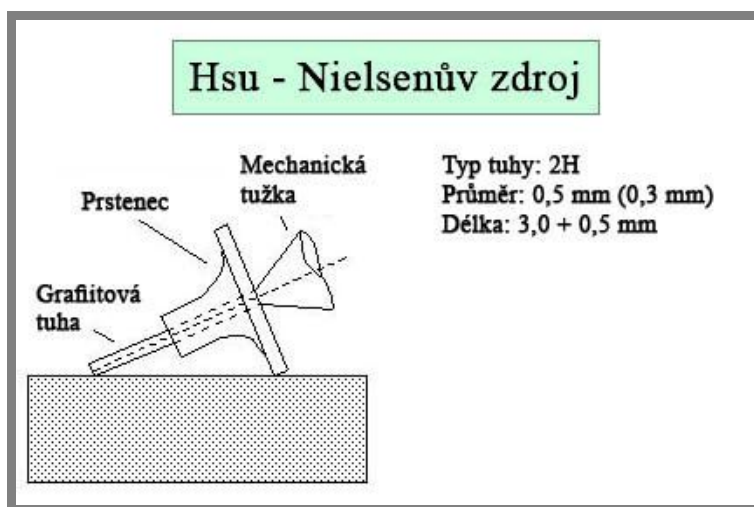
Obr. 2.2-3 Software DADEL Daemon – Konfigurace systému

V programu DAKEL Daemon je možné během měření zobrazit průběh signálu, počet překmitů přes nastavené hladiny, trend signálu v čase nebo jednotlivé události ve frekvenční oblasti. To vše je možné zaznamenat na pevný disk.



Obr. 2.2-4 Software DAKEL Daemon – Zobrazení překmitů přes hladiny a události

Pro zjištění, zda je signál dostatečně silný, se provádí zkouška s Hsu-Nielsenovým zdrojem, kdy se na povrchu, kde je umístěný snímač nebo v jeho blízkosti, zlomí grafitová tuha speciálně upravené mechanické tužky. Na základě odezvy je vyhodnoceno, zda je potřeba signál zesílit nebo použít další externí zesilovač.



Obr. 2.2-5 Hsu-Nielsenův zdroj



Obr. 2.2-6 Externí zesilovač signálu DAKEL

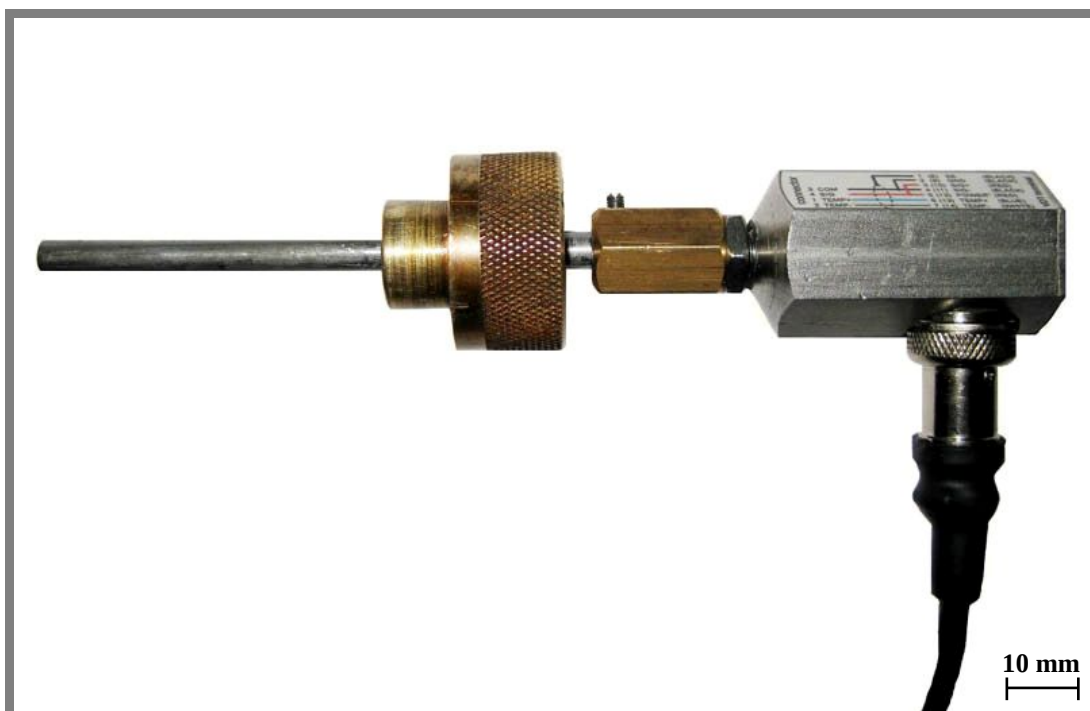
2.3

2.3 Požadavky na úpravu

Provedená úprava zkušebního zařízení SA67 by měla umožnit aplikaci metody akustické emise a současně moderních prostředků vibrační diagnostiky, které mohou být dále použity pro porovnání získaných výstupů obou metod v digitální podobě a odfiltrování události AE, které nesouvisí s poškozením ložiska.

Zároveň by měla být ponechána původní vibrační diagnostika pro rámcové ověření správnosti výstupů a pro vypnutí zařízení při dosažení limitních vibrací nebo teploty. Konstrukční úprava by měla být jednoduchá, snadno proveditelná a účelová.

Ústav konstruování spolupracuje v oblasti diagnostiky pomocí akustické emise s firmou DAKEL a v oblasti vibrační diagnostiky s firmou ViDiTech. Tyto firmy nabízejí pro danou diagnostickou metodu kompletní technické řešení a prostředky včetně software. Tyto technické prostředky jsou k dispozici ve zkušebně ústavu konstruování a je záměrem je pro úpravu zařízení použít.



Obr. 2.3-1 Snímač vibrací ViDiTech ATW 04 s vlnovodem

Konstrukční úprava zařízení má také umožnit použití uchycení snímače vibrací ViDiTech ATW 04, které bylo navržené Ing. Dvořáčkem (na Obr. 2.3-1). Toto uchycení je založeno na stejném principu jako uchycení původního snímače vibrací s přitlačnou pružinou zajišťující přítlak vlnovodu na povrch vnějšího kroužku ložiska definovanou silou.

Na závěr je potřeba konstrukční úpravu zařízení pro aplikaci metody akustické emise ověřit kontrolním měřením a takto prokázat, zda se podařilo aplikovat tuto metodu pro identifikaci stupně poškození ložisek na zkušebním zařízení SA67.

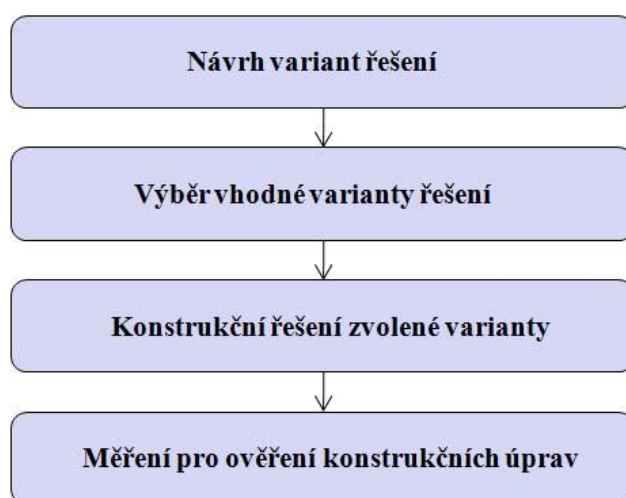
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem diplomové práce je navrhnout a prakticky ověřit konstrukční úpravy zařízení SA67 pro zkoušení ložisek s využitím metody akustické emise, zároveň také připravit zařízení pro aplikaci moderních prostředků vibrační diagnostiky.

Výstupem této práce budou technické výkresy navržených úprav zařízení a praktické měření akustické emise, které by mělo prokázat schopnost detekovat poškození ložiska zvolenými diagnostickými prostředky firmy DAKEL.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

V první řadě je potřeba ověřit, které diagnostické prostředky DAKEL pro detekci akustické emise jsou k dispozici a analyzovat možnosti jejich použití na zkušebním zařízení SA67. Je potřeba nalézt vhodný snímač nebo více snímačů a navrhnout jejich umístění a uchycení. Dále je vhodné vytvořit 3D model původního zařízení, ve kterém lze následně provést potřebné konstrukční úpravy a vytvořit podklady ve formě technických výkresů těchto úprav pro technika, který tyto úpravy na zařízení provede. Úpravy se provedou nejprve pouze na jedné stanici, pokud se zvolené řešení po kontrolních měřeních osvědčí, můžou být provedeny na dalších stanicích.



Pro vytvoření 3D modelu zařízení je potřeba jednotlivé součásti zařízení změřit a vymodelovat, poté je vložit do sestavy. Po vytvoření modelu původního zařízení se vytvoří další sestava, ve které se provedou konstrukční úpravy odpovídající zvolnému řešení. Z této sestavy se vygenerují výkresy dílů, kterých se úprava týká. Ve výkresech budou zakótovány pouze potřebné rozměry pro provedení konstrukčních úprav.

Nalezení správného řešení vyžaduje také konzultace o vhodnosti jednotlivých variant řešení s pověřenými pracovníky laboratoře a vedoucím diplomové práce.

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

Všechny varianty řešení obsahují analyzátor DAKEL – XEDO a PC software DAKEL Daemon. Především je potřeba vybrat vhodný typ snímače akustické emise s ohledem na jeho uchycení ke zkušebnímu zařízení.

Snímače DAKEL, které jsou vhodné pro snímání AE z valivých ložisek a jsou také k dispozici v laboratoři ústavu konstruování, jsou zobrazeny na Obr. 5-1. Mezi tyto snímače patří 4 typy snímačů, jsou seřazené dle velikosti: MICRO, MIDI, MDK-17 a MTPA-15.



Obr. 5-1 Snímače AE DAKEL

Snímače MICRO a MIDI se připevňují lepením na povrch, snímač MDK-17 má magnetický držák a snímač MTPA-15 je možné přilepit, připevnit speciální konstrukcí nebo převlečnou maticí k vlnovodu, který dodává firma DAKEL v požadované délce.

Představené varianty zvažují umístění a uchycení jednotlivých snímačů na zkušební stanici SA67. Při každé variantě jsou uvedené výhody a nevýhody daného řešení. Jednotlivé varianty a jejich zhodnocení vychází z logických úvah a ze zkušenosti osob, které provádějí měření s těmito snímači.

5.1 Varianty řešení

1. Varianta - Snímač nalepený na skříni zařízení

výhody

+ bez konstrukčního zásahu

+ malé rozměry

nevýhody

- nutno odstranit barvu, velmi dobře očistit a odmastit
- AE také z podpěrných ložisek
- větší útlum signálu
- možnost poškození při demontáži

2. Varianta - Snímač připevněn magneticky na skříni zařízení

výhody

- + jednoduchost montáže bez konstrukčního zásahu
- + drží i na nalakovaném povrchu
- + citlivější než lepené snímače

nevýhody

- AE také z podpěrných ložisek
- v případě umístění na lakovaný povrch ztráta informací

3. Varianta - Snímač přichycen speciální konstrukcí ke skříni

výhody

- + dobrá charakteristika snímače

nevýhody

- nutnost konstrukce uchycení
- AE také z podpěrných ložisek

4. Varianta - Snímač připevněn k vlnovodu magneticky

výhody

- + AE přímo z testovaného ložiska

nevýhody

- může odpadnout

5. Varianta - Snímač připevněn k vlnovodu převlečnou maticí

výhody

- + AE přímo z testovaného ložiska
- + snímač pevně uchycen

nevýhody

- nutný konstrukční zásah

5.2 Zvolená varianta řešení

Jednotlivé varianty lze rozdělit především na varianty se snímačem umístěným na povrchu skříně a varianty se snímačem na vlnovodu. Výhodou variant s umístěním snímače na vlnovodu je v tom, že snímaná akustická emise vychází přímo z testovaného ložiska a úroveň šumu je tak menší a je možné získat kvalitnější a přehlednější záznam AE, který je důležité mít zvláště v laboratorních podmínkách

při zkoumání možnosti aplikace této metody pro identifikaci stupně poškození ložisek. Výhodou variant umístění snímače na povrchu je především to, že není potřeba provádět konstrukční zásah, toto řešení je pak zvláště vhodné pro aplikace v praxi. Jako nejvhodnější řešení se proto jeví použít dva snímače jeden na vlnovodu a druhý snímač jako kontrolní na povrchu, tj. zvolená varianta bude kombinací dvou zkoumaných variant řešení.

S ohledem na způsob uchycení k zařízení je pro hlavní snímač vhodná varianta 5. se snímačem MTPA-15 připevněným k vlnovodu převlečnou maticí (Obr. 5.2-1) a pro snímač na povrchu varianta 2. se snímačem MDK-17 připevněným magneticky na povrchu (Obr. 5.2-2).



Obr. 5.2-1 Snímač DAKEL MTPA-15 s vlnovodem a převlečnou maticí

Parametry hlavního snímače DAKEL MTPA-15 jsou popsány v Tab. 5.2-1.

Tab. 5.2-1 Parametry snímače DAKEL MTPA-15 [29]

Rozměry	ø 22 mm, výška 52 mm
Materiál pouzdra	nerezová ocel
Dotyková plocha	ocelová membrána s Ni povrchem ø 18 mm
Provedení vývodu	axiální vývod - BNC konektor
Materiál piezoelementu	DAK 274
Provozní teploty	s keramikou DAK 274: -20 až +75°C
Určení snímačů	pro průmyslová měření akustické emise
Předzesilovač	vestavěný impedanční převodník se zesilovačem typ. 35 dB
Připevnění snímače	magnetickým držákem, lepením, přírubou



Obr. 5.2-2 Snímač DAKEL MDK-17

Parametry kontrolního snímače DAKEL MDK-17 jsou popsány v Tab. 5.2-2.

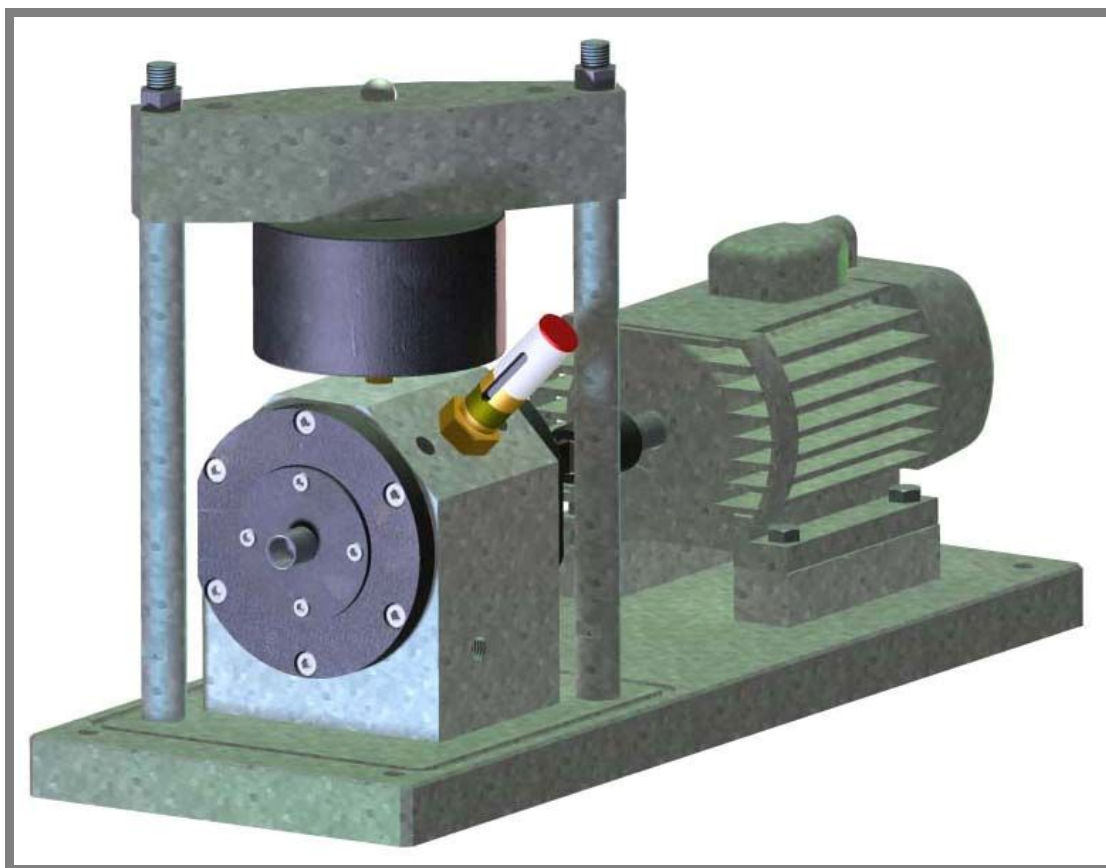
Tab. 5.2-2 Parametry snímače DAKEL MDK-17 [30]

Rozměry	ø 17mm, výška 12.5 mm
Materiál pouzdra	nerezová ocel
Dotyková plocha	FeNdB magnetický disk ø 15 mm
Provedení vývodu	radiální vývod koaxiálním kabelem o průměru 1.7 mm s BNC konektorem
Materiál piezoelementu	DAK 432
Provozní teploty	-20 až +75°C
Určení snímačů	pro laboratorní měření akustické emise na malých měřených objektech
Předzesilovač	není, snímač vyžaduje externí koaxiálový impedanční převodník s předzesilovačem, pokud je koaxiálová trasa delší než cca 2 m
Přípevnění snímače	magneticky

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Předmětem konstrukčního řešení je navrhnout uchycení snímače DAKEL MTPA-15 s vlnovodem tak, aby se konec vlnovodu dotýkal povrchu vnějšího kroužku testovaného ložiska. Snímač DAKEL MDK-17 bude připevněn vlastním magnetickým držákem na povrchu skříně v blízkosti testovaného ložiska a nevyžaduje žádnou konstrukční úpravu. Povrchu ložiska se budou dotýkat celkem 3 vlnovody – původního snímače vibrací, snímače akustické emise a moderního snímače vibrací.

Aby bylo možné v budoucnu provádět také zkoušky v olejové lázni, je potřeba umístit snímače v horní polovině zařízení, aby nedošlo k jejich poškození, pokud by byly zaplaveny olejem nebo emulzí.



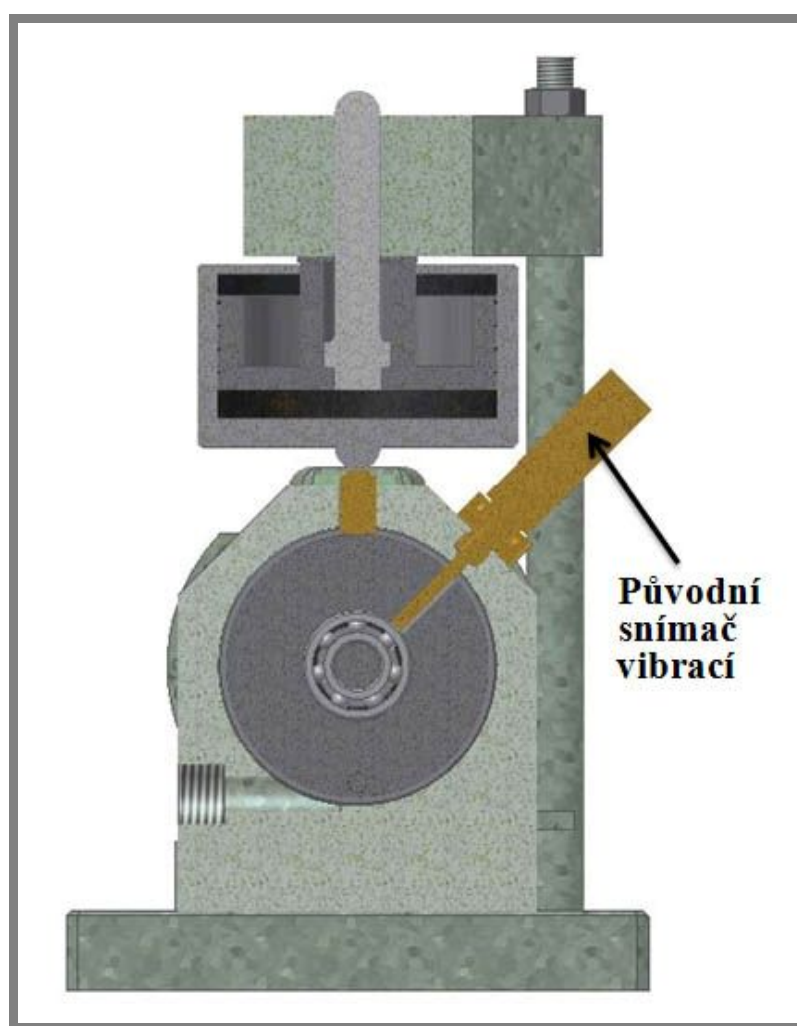
Obr. 6-1 3D model původního zařízení

3D Model zařízení byl vytvořen v programu Autodesk Inventor. Pro jeho zhotovení bylo potřeba demontovat část zařízení a poměřit jednotlivé součásti. Části zařízení jako potrubí hydraulické kapaliny, potrubí mazání a ukazatel hladiny oleje pro zkoušky v olejové lázni, kryt hřídele a kabeláž nejsou s ohledem na zadání a přehlednost zahrnuty.

Popis zkušební stanice včetně jednotlivých dílů je již uveden v 2. kapitole této diplomové práce.

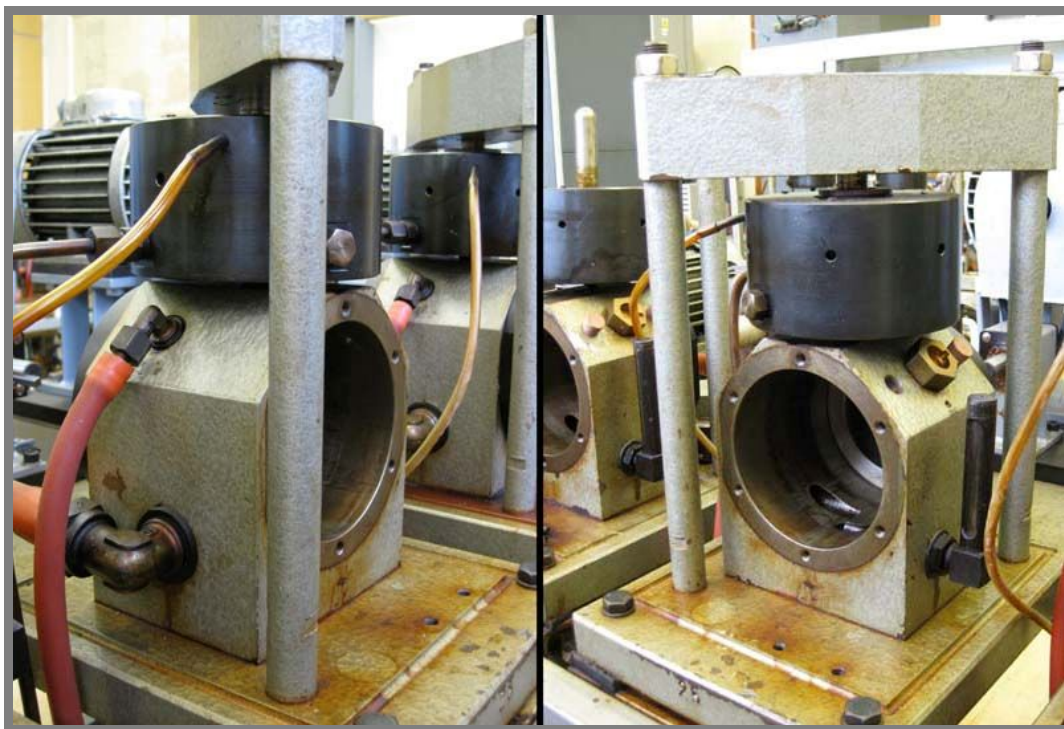
Na Obr. 6-2 je zobrazeno zařízení v řezu, který prochází pouzdrům, ve kterém se nachází testované ložisko. V tomto pohledu je viditelné, jak se vlnovod původního snímače vibrací tečně dotýká povrchu kroužku ložiska. Takto tečně by se měly

dotýkat kroužku i ostatní snímače, aby byl minimalizován útlum. Z pohledu tohoto řezu je zřejmé, že pokud se mají snímače s vlnovody nacházet v horní polovině zařízení a mají se tečně dotýkat povrchu, aniž by byly provedeny větší konstrukční zásahy, naskytují se celkem 4 takové pozice, 2 shora pod úhlem 45° k základně, 2 po stranách. Postačí však 3 pozice. Pozice na levé straně skříně bude ponechána prázdná, jelikož na této straně je větší riziko poškození potrubí hydraulické kapaliny nebo mazání při dotahování uchycení snímačů (Obr. 6-3). Jedna boční pozice musí zůstat volná také proto, že s ohledem na vzdálenost mezi jednotlivými stanicemi a velikost snímačů s vlnovodem, nelze umístit dva snímače proti sobě. U pozic shora je také menší pravděpodobnost znečištění snímačů při zkouškách v olejové lázni. Na pravé straně je sice ukazatel hladiny oleje, ale ten svými rozměry nezasahuje do místa potřebného pro uchycení snímače.

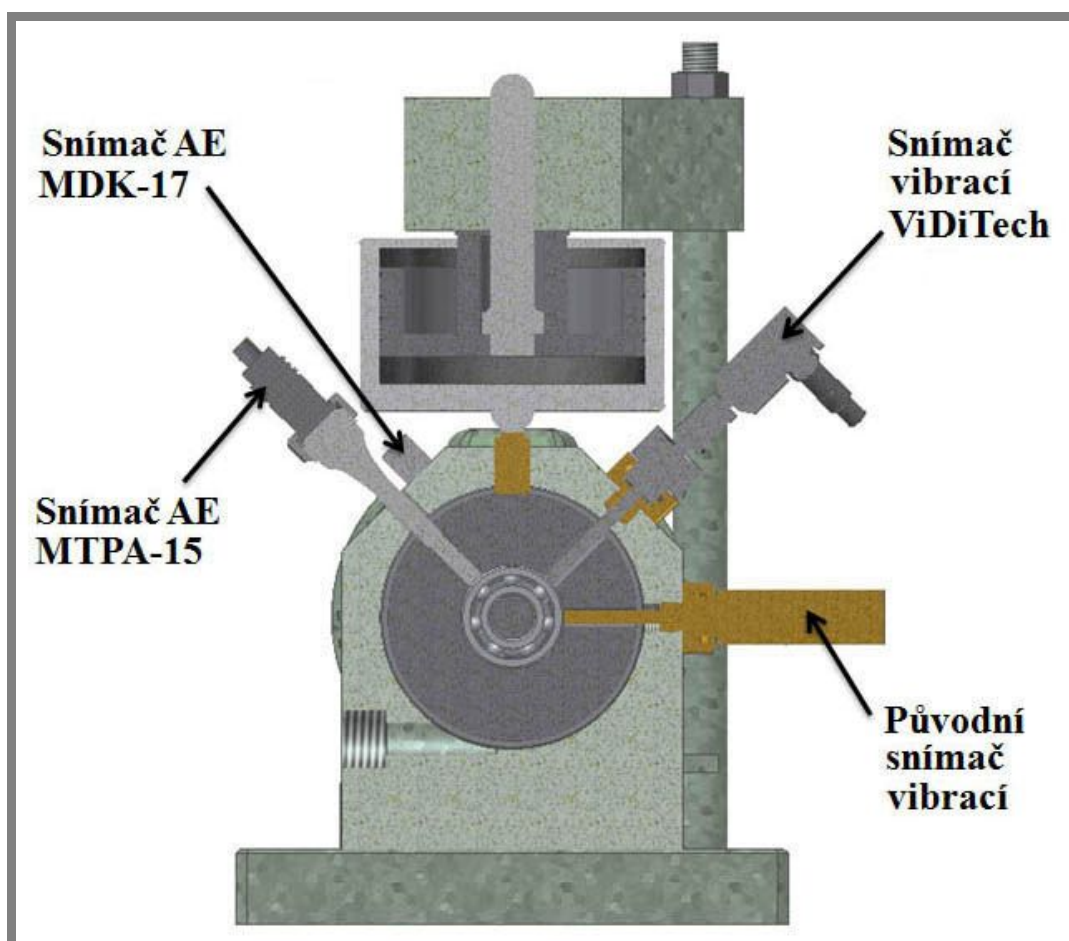


Obr. 6-2 Pohled v řezu - původní snímač

Snímače akustické emise je vhodné umístit blízko sebe, aby si signály co nejlépe odpovídaly, pokud budou porovnávány. Vhodné místo pro tyto snímače je na levé horní ploše. Snímač ViDiTech ATW 04 s vlnovodem je delší než původní snímač, je proto vhodné ho umístit na pravé straně shora a původní snímač přesunout na boční stranu zařízení.

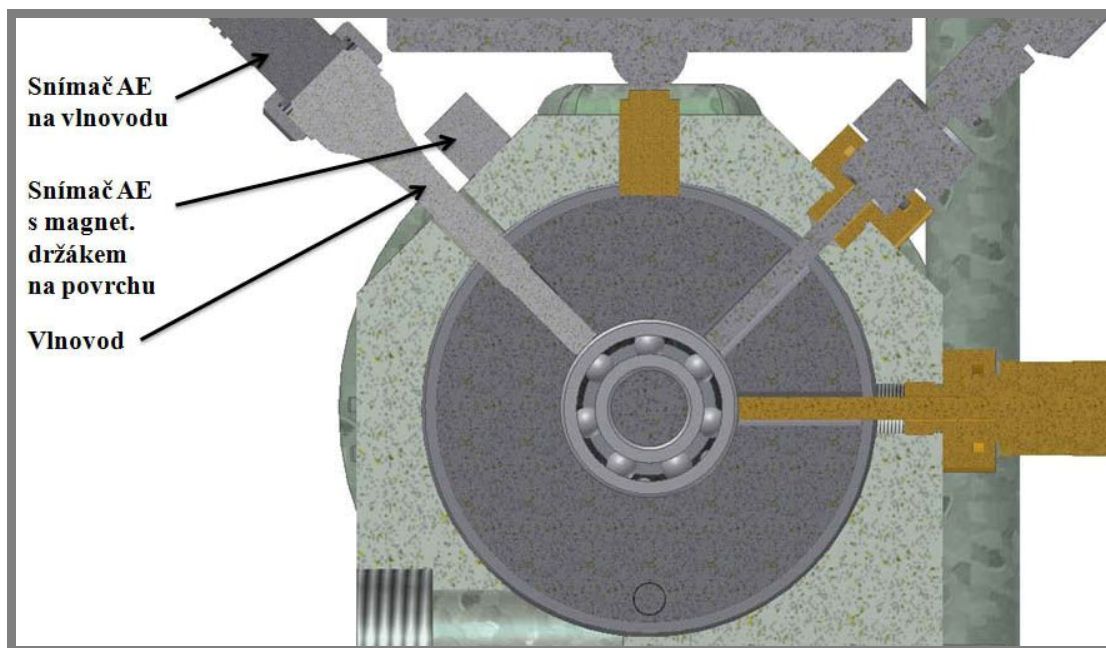


Obr. 6-3 Pohled na skříň zkušební stanice SA67 zleva a zprava



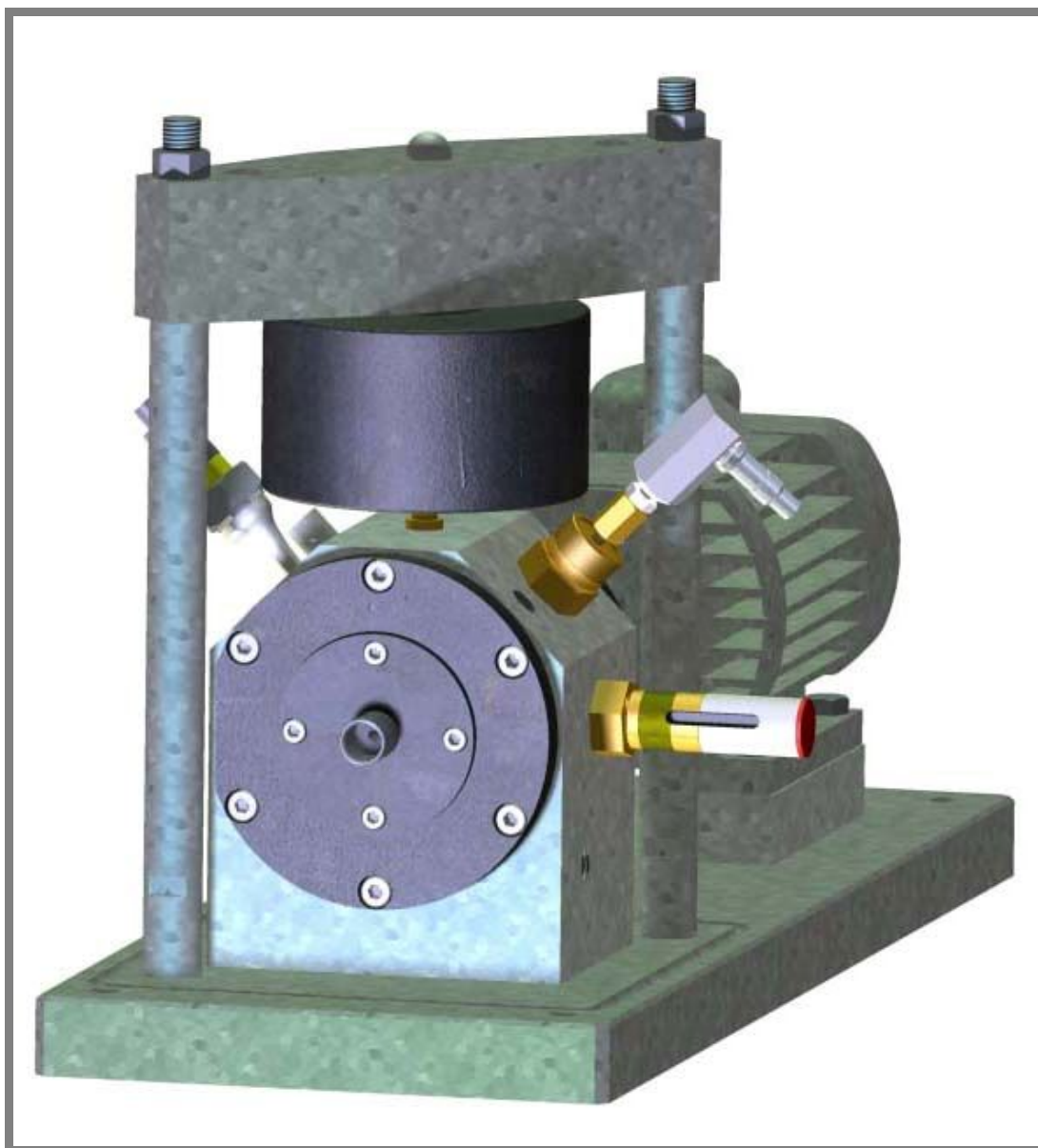
Obr. 6-4 Pohled v řezu - rozmístění snímačů

Na Obr. 6-4 je již zobrazeno navržené rozmístění snímačů, jejichž vlnovody procházejí skříní a pouzdrem, ve kterém se nachází testované ložisko. Konstrukční úprava se bude týkat především těchto dvou dílů. Uchycení obou vibračních snímačů mají závit M14x1, proto postačí vyvrtat jeden další otvor s tímto závit na pravé straně skříně pro uchycení přemístěného původního snímače vibrací. Je rovněž potřeba vyvrtat otvor pro vlnovod v pouzdře, průměry vlnovodů vibračních snímačů jsou také stejné a to 6 mm, postačí tak vyvrtat stejný otvor o průměru 9 mm. Je tak zajištěno, že se vlnovod bude dotýkat pouze povrchu vnějšího kroužku testovaného ložiska.



Obr. 6-5 Rozmístění snímačů – zvětšený pohled

Vlnovod snímače AE je uchycen závitěm pouze v pouzdře, aby byl minimalizován útlum, který vede ke ztrátě diagnostické informace. Firma DAKEL dodává vlnovody v požadované délce, vlnovod je však potřeba upravit pro uchycení v pouzdře. Dodávaný vlnovod má u konce průměr 8 mm a je možné na něm vytvořit závit M8. Vlnovod je připevněn tímto závitěm pouze v části pouzdra, zbytkem prochází volně dírou o průměru 9 mm a dírou ve skříní o průměru 12 mm. Celkový pohled na model zařízení s nově navrženým rozmístěním snímačů je zobrazen na Obr. 6-6.



Obr. 6-6 Rozmístění snímačů – celkový pohled

Aby bylo možné jednotlivá měření AE porovnávat, je potřeba zajistit, aby konec vlnovodu působil na vnější kroužek testovaného ložiska při každém měření stejnou silou. To je možné zajistit dotažením vlnovodu momentovým klíčem. Upravený tvar konce vlnovodu, kde se poté připevní snímač AE převlečnou maticí, toto dovoluje. Model upraveného vlnovodu je zobrazen na Obr. 6-7. Momentové klíče, které umožňují dotažení požadovaným momentem, jsou vybavena analogovým nebo digitálním měřičem, které zobrazují velikost momentu, některé klíče mají také výstup na externí signalizační zařízení. Na konec momentového klíče je možné umístit násadu požadovaného tvaru a rozměru. Příklad momentového klíče s analogovým měřidlem je uveden na Obr. 6-8.



Obr. 6-7 Upravený vlnovod DAKEL – 3D model



Obr. 6-8 Příklad momentového klíče [31]

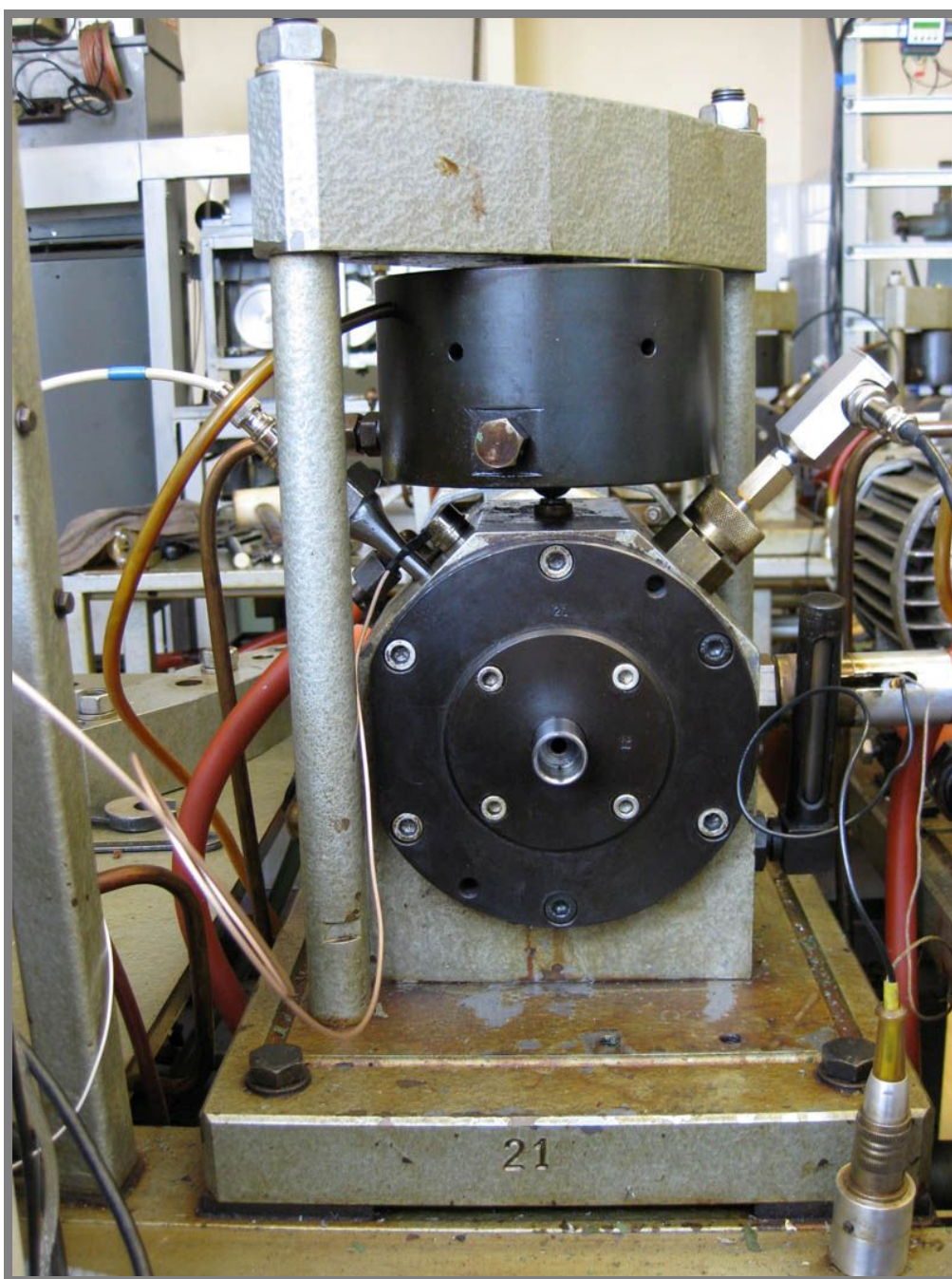
Provedené úpravy jsou zobrazené na následujících obrázcích. Vlnovod DAKEL po úpravě je zobrazen na Obr. 6-9, umístění snímačů akustické emise s otvorem pro vlnovod na Obr. 6-10 a celkový pohled na upravené zařízení na Obr. 6-11. Technické výkresy jednotlivých úprav jsou v příloze diplomové práce.



Obr. 6-9 Upravený vlnovod DAKEL



Obr. 6-10 Umístění snímačů AE



Obr. 6-11 Upravené zařízení – celkový pohled

7 KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ

7.1 Měření pro ověření konstrukčních úprav

Dne 11. 5. 2009 byla provedena orientační zkouška trvanlivosti nezakrytého radiálního valivého ložiska DPI čínského výrobce (Obr. 7.1-1). Ložisko bylo vymyté a zkouška probíhala na sucho bez maziva. Předpokládaná délka zkoušky při zatížení 3000 N byla 120 min., po překročení této doby bylo zatížení zvětšeno na 4000 N. Trvanlivost ložiska za těchto podmínek dosáhla 168 min.



Obr. 7.1-1 Testované ložisko DPI (Čína)

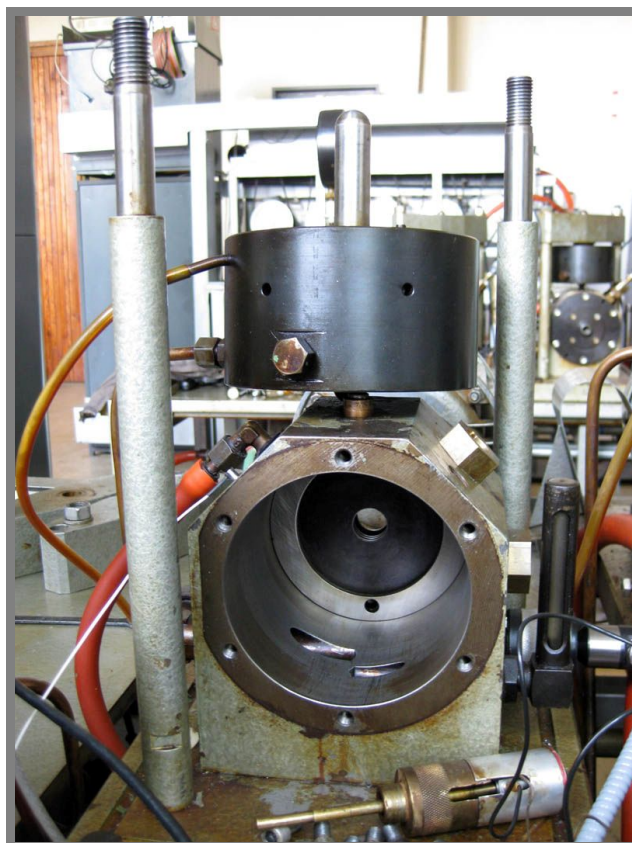
7.1.1 Příprava stanice pro měření

Zkouška byla provedena na upravené stanici č. 21. Přípravy před vlastním měřením trvaly 1,5 hodiny. Stanice byla po provedení úprav již částečně demontována. Bylo potřeba nalisovat testované ložisko s pouzdrem, dva podpěrná ložiska a distančními kroužky byly na hřídel (Obr. 7.1-2). Po nalisování byly ložiska zajištěné pojistným kroužkem, taktéž testované ložisko v pouzdře. Dále byly nasazené pouzdra i na podpěrná ložiska a celek vsunut do skříně. Pouzdra byly zajištěné kolíkem, který zamezuje jejich pootočení. Poté bylo nasazeno a dotaženo víko. Následně byl na přítlačný kolík umístěn hydraulický válec, jehož poloha byla zajištěna ramenem.

Dalším krokem bylo umístění snímačů. Na povrch byl umístěn snímač akustické emise DAKEL MDK-17 s magnetickým držákem. Na konce všech vlnovodů bylo nanášeno vazební prostředí, které zlepšuje přechod vlnění mezi přechodovými plochami. Vlnovod pro snímač DAKEL MTPA-15 byl zašroubován do pouzdra a dotažen klíčem, poté byl k němu připevněn samotný snímač převlečnou maticí. Dále byl zasunutý a zajištěný snímač vibrací, původní snímač a snímač ViDiTech ATW 04.



Obr. 7.1-2 Nalisování ložisek na hřídel



Obr. 7.1-3 Demontovaná stanice

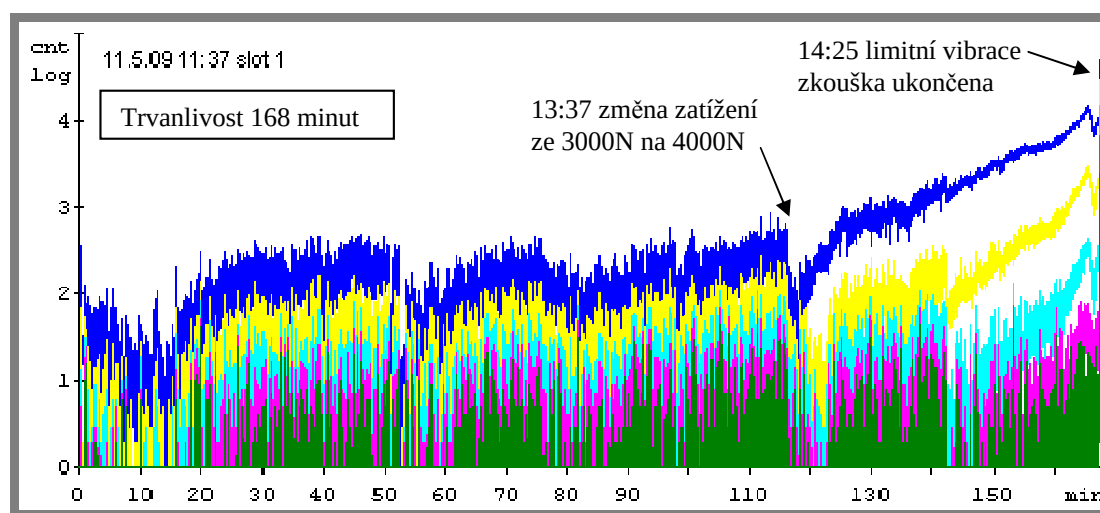
Pro měření byly použité pouze snímače akustické emise a původní snímač vibrací. Snímač ViDiTech není pro měření použit, předmětem této práce je pouze umožnit jeho uchycení a aplikaci po zprovoznění patřičného software.

Snímače AE byly připojeny k analyzátoru DAKEL – XEDO. Pro snímač na povrchu byl použit externí zesilovač signálu. Následně byla provedena konfigurace systému pro zpracování a záznam signálu, jednalo se především o nastavení zesílení signálu, frekvence vzorkování a nastavení hladin a události.

7.1.2

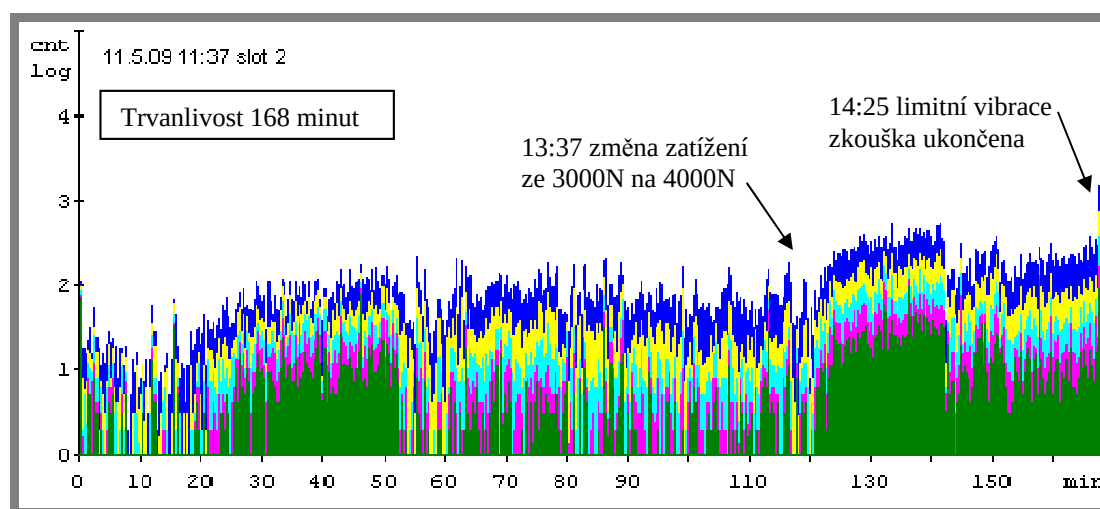
7.1.2 Záznam signálu AE

Záznam zpracovaného signálu ze snímače umístěného na vlnovodu je na Obr. 7.1-4. Tento záznam je po zobrazení hladin 3 až 7 velice přehledný, je v něm vidět moment, kdy bylo z důvodu zkrácení zkoušky zvýšeno zatížení, taktéž nárůst překmitů přes vyšší hladiny.



Obr. 7.1-4 Záznam signálu ze snímače na vlnovodu

Na Obr. 7.1-5 je zobrazen záznam signálu ze snímače na povrchu. Vývoj poškození z tohoto záznamu není tak zřejmý ve srovnání se záznamem signálu ze snímače na vlnovodu. Je to způsobeno větší úrovní šumu ve snímaném signálu.



Obr. 7.1-5 Záznam signálu ze snímače na povrchu

Aby bylo možné lépe identifikovat stupeň poškození a jeho vývoj v čase v signálu s větší úrovní šumu, je potřeba hledat další parametry signálu, které toto poškození popisují znatelněji.

V příloze diplomové práce se nachází *Protokol o zkoušce*, ve kterém je blíže popsán průběh a parametry provedené zkrácené zkoušky trvanlivosti.

7.2 Ekonomický rozbor

7.2

Úpravy zařízení a aplikace metody akustické emise na zařízení SA67 jsou hrazeny z projektu Ministerstva průmyslu a obchodu IMPULS FI-IM3/163. Uvedené náklady jsou pouze hrubým odhadem a nemusí se zcela shodovat se skutečnými náklady.

Odhadované náklady zahrnují přímé náklady, ve kterých je započtena cena zakoupeného vlnovodu DAKEL, vrták nebo opotřebení nástroje. Dále tyto náklady zahrnují potřebné mzdové prostředky na pracovníka, který bude úpravu provádět, příspěvek do fondu náhrad, zákonné odvody, režijní náklady pracoviště, odvod za zmocněné osoby a daň z přidané hodnoty.

Náklady na konstrukční úpravu jedné stanice včetně zakoupení a úpravy vlnovodu DAKEL jsou odhadovány na 3000 Kč. Tudíž cena úprav všech 20 stanic je odhadována na 60 000 Kč.

Rozbor nákladů je blíže specifikován v příloze *Kalkulace zakázky doplňkové činnosti*.

7.3 Závěr

7.3

Ze záznamu signálů ze snímačů akustické emise je možné identifikovat stupeň poškození ložiska a jeho vývoj v čase, lze proto považovat toto měření za úspěšné ověření provedených konstrukčních úprav na zkušebním zařízení SA67.

Dalším krokem může být nalezení vhodných parametrů signálu akustické emise, které umožní lépe identifikovat poškození v signálu s větší úrovní šumu, a aplikace moderních prostředků vibrační diagnostiky, jejichž výstup by bylo možné v první řadě porovnat s výstupy metody akustické emise a následně najít vhodnou korelaci mezi těmito výstupy. Tuto korelaci by bylo možné poté využít pro odstranění události akustické emise, které nesouvisí s poškozením ložisek.

Po nalezení vhodné korelace výstupů těchto diagnostických metod a odpovídajícího nastavení měřicího systému bude možné účinně použít obě diagnostické metody současně pro srovnávání parametrů ložisek stejného typu od různých výrobců. Tato ložiska by byla testována s vlastní náplní maziva. Zařízení by také mohlo být využité pro zkoumání kvalit maziv při zkouškách ložisek v olejové lázni. Při těchto zkouškách by bylo testováno ložisko stejného výrobce, nejlépe také stejné výrobní série, aby byl minimální rozptyl vlastností ložiskového materiálu a jeho zpracování, a bylo tak možné dostatečně rozlišit kvalitu jednotlivých maziv. Využití zařízení pro zkoušky ložisek v olejové lázni by však vyžadovalo ověření funkčnosti mazacího systému s oběhovým čerpadlem a zajištění těsnosti zařízení, aby nedošlo k poškození snímačů.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2006. 406 s. ISBN 80-7300-158-6
- [2] International Organization for Standardization [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.iso.org>>
- [3] BOLEK, A., KOCHMAN, J. *Části trojúh.* 5. vyd. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00046-7
- [4] *ZKL – Rozdělení základních druhů ložisek* [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.zkl.cz/czech/manual.aspx?page=rozdeleni>>
- [5] THB Bearings Co., Ltd. *Products* [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.thb-bearings.com/cp/Large%20Size1.jpg>>
- [6] *Průručka SKF pro údržbu ložisek*. SKF, 1991. 333 s. Reg 70.3 000.1993-12
- [7] *Degradace strojních součástí – Opatření povrchovou únavou* [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://degradace.tf.czu.cz>>
- [8] *Diagnostické systémy* [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.uk.fme.vutbr.cz>>
- [9] SKF *Průvodce vibrační diagnostikou*. Praha: DIF s.r.o., 1995. 66 s. CM5003-CZ
- [10] *Vibrační diagnostika* [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.337.vsb.cz>>
- [11] Český normalizační institut [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.cni.cz>>
- [12] FAG – Fischers Aktien - Gesellschaft [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.fag.com>>
- [13] Maverick Inspection Ltd., Canada [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.maverickinspection.com>>
- [14] TOMEH, E. *Diagnostic methodology of rolling element and journal bearings*. Liberec: Technical University of Liberec, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Vehicles and Engines 2007.
- [15] Preditest s.r.o. [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://www.preditest.cz>>
- [16] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: CERM – akademické nakladatelství, 2008. 570 s.
- [17] HOLROYD, T. *Acoustic Emission as a Basis for the Condition Monitoring of Industrial Machinery* [online]. [cit. 2009-02-22]. URL: <<http://home.btconnect.com/HOLROYD-INSTRUME>>
- [18] PETRÁŠ, J. *Detekce a lokalizace akustické emise na konstrukcích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. 105 s.
- [19] *Acoustic Emission Sensors* [online]. [cit. 2009-04-28]. URL: <http://www.fujicera.co.jp/product/e/05/image/p30_01.gif>
- [20] ČERNÝ, M., MAZAL, P., FILÍPEK, J. *Vliv délky a tvaru vlnovodu na snímání akustického signálu*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel Brun., 2008, LVI, No. 1, pp. 43-54
- [21] ČERNÝ, M., MAZAL, P., FILÍPEK, J. *Snímání akustického signálu vlnovody*. 2007.
- [22] *ZKL – Služby zkoušení ložisek* [online]. [cit. 2009-04-05]. URL: <<http://www.zkl.cz/czech/sluzby.aspx?page=zkouseni>>
- [23] *ZKL – Stručná charakteristika – Výzkum a vývoj* [online]. [cit. 2009-04-05].

- URL: <http://www.zkl.cz/czech/koncern_zakl_profily.aspx?name=vav>
- [24] ZKL – Zkušební zařízení trvanlivosti radiálních ložisek s cyklickým zatěžováním [online]. [cit. 2009-04-05].
URL: <<http://www.zkl.cz/img/fotoprovozy/VaV/001.jpg>>
- [25] ZKL – Zkušební zařízení trvanlivosti radiálních ložisek s konstantním zatěžováním [online]. [cit. 2009-04-05].
URL: <<http://www.zkl.cz/img/fotoprovozy/VaV/004.jpg>>
- [26] HORT, F., MAZAL, P., VLAŠIC, F. *Výsledky využití systému s úplným vzorkováním signálu AR pro detekci kontaktního poškození materiálu a ložisek*, 2008.
- [27] DAKEL – Analyzátor – Systém DAKEL-XEDO [online]. [cit. 2009-05-12].
URL: <<http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/dev/xedo>>
- [28] DAKEL – Snímače akustické emise [online]. [cit. 2009-05-12].
URL: <<http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens>>
- [29] DAKEL – Snímače AE typ MTPA-15 [online]. [cit. 2009-05-15].
URL: <<http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens/mtr15>>
- [30] DAKEL – Snímače AE typ MDK-17 [online]. [cit. 2009-05-15].
URL: <<http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens/mdk17>>
- [31] NATIS – Analogové měřidlo momentu TOHNICHI CDB [online]. [cit. 2009-05-15].
URL: < http://www.natis.cz/data/images/65_0_tn2.jpg >

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam použitých zkratek

<i>aj.</i>	- a jiné
<i>atd.</i>	- a tak dále
<i>event.</i>	- eventuálně
<i>např.</i>	- například
<i>popř.</i>	- popřípadě
<i>tj.</i>	- to jest
<i>tzv.</i>	- tak zvaný

9.2 Seznam použitých symbolů a veličin

B_d	[mm]	- roztečný průměr kuličky nebo válečku
D	[mm]	- vnější průměr ložiska
P_d	[mm]	- roztečný průměr ložiska
C_{10}	[kN]	- základní dynamická únosnost
L_{10}	[h, ot.]	- základní trvanlivost
T	[s]	- perioda
a_m	[m·s ⁻²]	- amplituda
d	[mm]	- vnitřní průměr ložiska
f	[Hz]	- frekvence
f_r	[Hz]	- frekvence daná otáčkami vnitřního a vnějšího kroužku
n	[-]	- počet kuliček nebo válečků
t	[s]	- čas
v_m	[mm·s ⁻¹]	- rychlost
y_m	[μm]	- výchylka
φ	[°]	- úhel dotyku

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

10

Obr. 1.2-1	Valivá ložiska [5]	18
Obr. 1.3-1	Vývoj poškození ložiska [10]	19
Obr. 1.3-2	Pitting na kroužku ložiska a valivém tělese ve velmi pokročilém stádiu [7]	19
Obr. 1.3-3	Havárie turbíny následkem závažného poškození valivých ložisek [10]	20
Obr. 1.5-1	Určující veličiny vibrací [10]	22
Obr. 1.5-2	Základní směry pro měření celkových vibrací [1]	22
Obr. 1.5-3	Rozměry ložiska [10]	23
Obr. 1.5-4	Amplitudové modulace [10]	24
Obr. 1.5-5	Projev poškození získaný obálkou signálu zrychlení [10, 12]	25
Obr. 1.6-1	Schopnost detekce poškození ložisek metodou AE a vibrační diagnostikou [14]	26
Obr. 1.6-2	Piezoelektrický snímač akustické emise [19]	27
Obr. 1.6-3	Hodnocené parametry impulzního signálu [15]	28
Obr. 1.6-4	Zobrazení akustické emise při styku valivého tělesa s vnitřním kroužkem [17]	28
Obr. 1.6-5	Vliv rychlosti a zatížení na velikost akustické emise valivého ložiska [17]	29
Obr. 1.7-1	Porovnání intenzity signálu (mV, μ s) [21]	29
Obr. 1.7-2	Vlnovody – hyperbolické a kuželové [21]	30
Obr. 1.7-3	Snímač s integrovaným vlnovodem	30
Obr. 1.7-4	Speciální uchycení vlnovodu [21]	30
Obr. 1.8-1	ZKL - Zkušební zařízení trvanlivosti radiálních ložisek s cyklickým zatěžováním [24]	31
Obr. 1.8-2	ZKL - Zkušební zařízení trvanlivosti radiálních ložisek s konstantním zatěžováním [25]	32
Obr. 2-1	Zkušební stanice SA67	33
Obr. 2.1-1	Zkušební stanice SA67 – pohled zepředu	34
Obr. 2.1-2	Zkušební stanice SA67 – pohled zleva	35
Obr. 2.1-3	Zkušební stanice SA67 – pohled shora	35
Obr. 2.1-4	Řídící panel	36
Obr. 2.1-5	Popis zařízení	37
Obr. 2.1-6	Snímač vibrací	38
Obr. 2.2-1	Analyzátor DAKEL – XEDO	39
Obr. 2.2-2	Sortiment snímačů DAKEL [28]	40
Obr. 2.2-3	Software DAKEL Daemon – Konfigurace systému	40
Obr. 2.2-4	Software DAKEL Daemon – Zobrazení překmitů přes hladiny a události	41
Obr. 2.2-5	Hsu-Nielsenův zdroj	41
Obr. 2.2-6	Externí zesilovač signálu DAKEL	42
Obr. 2.3-1	Snímač vibrací ViDiTech ATW 04 s vlnovodem	42
Obr. 5-1	Snímače AE DAKEL	46
Obr. 5.2-1	Snímač DAKEL MTPA-15 s vlnovodem a převlečnou maticí	48
Obr. 5.2-2	Snímač DAKEL MDK-17	49

Obr. 6-1	3D model původního zařízení	50
Obr. 6-2	Pohled v řezu - původní snímač	51
Obr. 6-3	Pohled na skříň zkušební stanice SA67 zleva a zprava	52
Obr. 6-4	Pohled v řezu - rozmístění snímačů	52
Obr. 6-5	Rozmístění snímačů – zvětšený pohled	53
Obr. 6-6	Rozmístění snímačů – celkový pohled	54
Obr. 6-7	Upravený vlnovod DAKEL – 3D model	55
Obr. 6-8	Příklad momentového klíče [31]	55
Obr. 6-9	Upravený vlnovod DAKEL	56
Obr. 6-10	Umístění snímačů AE	56
Obr. 6-11	Upravené zařízení – celkový pohled	57
Obr. 7.1-1	Testované ložisko DPI (Čína)	58
Obr. 7.1-2	Nalisování ložisek na hřídel	59
Obr. 7.1-3	Demontovaná stanice	59
Obr. 7.1-4	Záznam signálu ze snímače na vlnovodu	60
Obr. 7.1-5	Záznam signálu ze snímače na povrchu	60

11 SEZNAM TABULEK

11

Tab. 5.2-1 Parametry snímače DAKEL MTPA-15 [29]	48
Tab. 5.2-2 Parametry snímače DAKEL MDK-17 [30]	49

Technický výkres úprav – SKŘÍŇ
Technický výkres úprav – POUZDRO
Technický výkres úprav – VLNOVOD
Protokol o zkoušce
Kalkulace zakázky doplňkové činnosti