

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Poruchy ložisek v elektrických strojích

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal KAMARYT**
Osobní číslo: **E12B0222P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Poruchy ložisek v elektrických strojích**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r ō v y p r a c o v á n í :

1. Rozeberte nejčastější příčiny poruchy ložisek v elektrických strojích.
2. Popište metody pro detekci poruchy ložisek v elektrických strojích.
3. Porovnejte jednotlivé metody z hlediska náročnosti na přístrojové vybavení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

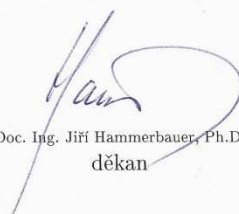
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Šobra


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na poruchy ložisek v elektrických strojích. Jsou zde rozebrány mechanismy vzniku poškození ložisek a typické provozní a montážní faktory, které tyto mechanismy urychlují. Dále jsou zde popsány principy některých běžně používaných metod bezdemontážní diagnostiky ložisek a tyto metody jsou porovnány. V závěru jsou také ukázány některé komerčně dostupné přístroje používané pro včasnou detekci vznikajících poruch ložisek.

Klíčová slova

Ložisko, poruchy ložisek, bezdemontážní diagnostika, vibrační diagnostika.

Abstract

This bachelor's thesis presents typical mechanisms which contribute to the development of bearing faults in electric machines and operating factors that accelerate these mechanisms. The thesis also describes some basic principles behind commonly used methods for early detection of bearing faults, compares these methods and presents some commercially available devices used for early detection of developing bearing faults.

Key words

Bearing, bearing faults, early diagnosis, vibration diagnostics.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Michal Kamaryt

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šobrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 DRUHY LOŽISEK A JEJICH POUŽITÍ	11
1.1 KLUZNÁ LOŽISKA.....	11
1.1.1 <i>Hydrostatická a hydrodynamická ložiska</i>	12
1.1.2 <i>Typické použití kluzných ložisek</i>	13
1.2 VALIVÁ LOŽISKA.....	14
1.2.1 <i>Rozdělení valivých ložisek</i>	15
1.3 VZDUCHOVÁ A MAGNETICKÁ LOŽISKA.....	15
1.3.1 <i>Vzduchová ložiska</i>	16
1.3.2 <i>Magnetická ložiska</i>	16
2 PORUCHY LOŽISEK A JEJICH ČASTÉ PŘÍČINY	18
2.1 MECHANICKÉ OPOTŘEBENÍ MATERIÁLU.....	18
2.1.1 <i>Adhezivní opotřebení</i>	18
2.1.2 <i>Abrazivní opotřebení</i>	19
2.1.3 <i>Únavové opotřebení</i>	20
2.1.4 <i>Vibrační opotřebení</i>	21
2.2 KOROZE.....	22
2.3 RÁZY A PŘETÍŽENÍ.....	22
2.4 ELEKTRICKÉ OPOTŘEBENÍ LOŽISEK A LOŽISKOVÉ PROUDY.....	22
2.5 ČASTÉ PŘÍČINY PŘEDČASNÉHO SELHÁNÍ LOŽISEK.....	24
2.5.1 <i>Nedostatečná lubrikace</i>	24
2.5.2 <i>Vadné těsnění</i>	24
2.5.3 <i>Špatná montáž</i>	24
2.5.4 <i>Nezamezení průchodu proudu ložiskem</i>	25
2.5.5 <i>Nerovnoměrné zatížení a jednostranný magnetický tah</i>	25
3 METODY DETEKCE PORUCH	26
3.1 DETEKCE PORUCH KLUZNÝCH LOŽISEK.....	26
3.2 VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA.....	27
3.2.1 <i>Vhodné umístění snímače</i>	27
3.2.2 <i>Analýza vibrací v časové oblasti</i>	28
3.2.3 <i>Fourierova transformace</i>	29
3.2.4 <i>Analýza vibrací ve frekvenční oblasti</i>	29
3.3 METODA RÁZOVÝCH PULSŮ (SPM).....	31
3.4 TERMOGRAFIE.....	33
3.5 DALŠÍ METODY DETEKCE PORUCH.....	33
3.5.1 <i>Monitorování statorového proudu</i>	33
3.5.2 <i>Hluková diagnostika</i>	34
3.5.3 <i>Akustické emise (AE)</i>	34
3.6 SROVNÁNÍ UVEDENÝCH METOD DIAGNOSTIKY.....	34
ZÁVĚR	36
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37
SEZNAM OBRÁZKŮ	39
SEZNAM ROVNIC	39

Úvod

Ložiska jsou nedílnou součástí elektrických strojů a stav ložisek je jedním z hlavních faktorů ovlivňující životnost celého stroje. Selhání ložiska může způsobit škody na jiných částech stroje i v jeho bezprostředním okolí a může znamenat i bezpečnostní riziko. V každém případě ale selhání ložiska znamená odstávku stroje, se kterou jsou často spojené i finanční škody. Provozováním poškozeného ložiska, i v případě že nedojde k úplnému selhání jeho funkce, vznikají negativní důsledky, jako je vyšší hlučnost a nižší účinnost celého stroje. Proto je v zájmu každého provozovatele elektrického stroje věnovat zvláštní pozornost stavu ložiska a implementovat metody pro detekci poruch ložiska už v jejich začátcích.

Tato rešerše je rozdělena na tři hlavní kapitoly. V první kapitole jsou uvedeny používané typy ložisek a jsou popsány základní principy jejich funkce. Druhá kapitola se zabývá mechanismy vzniku poškození ložisek a provozními faktory, které tyto mechanismy ovlivňují. Obsahem třetí kapitoly jsou běžně používané metody diagnostiky ložisek za provozu, jsou zde stručně popsány principy těchto metod, je provedeno srovnání těchto metod a jsou zde ukázána některá komerčně dostupná zařízení používaná pro bezdemontážní diagnostiku ložisek.

Seznam symbolů a zkratek

dB_C	Decibel carpet level (charakteristická veličina metody SPM) [dB]
dB_i	Počáteční hodnota u metody SPM [dB]
dB_M	Maximum level (charakteristická veličina metody SPM) [dB]
dB_N	Normovaná veličina u metody SPM [dB]
F_m	Magnetický tah působící na hřídel [N]
FFT	Rychlá Fourierova transformace
PEAK.....	Špičková hodnota signálu [-]
RMS.....	Efektivní hodnota signálu [-]
SPM	Metoda rázových pulsů
U_H	Napětí mezi konci hřídele [V]
U_{HZ}	Napětí mezi hřídelí a zemí [V]
ω	Úhlová frekvence [rad/s]

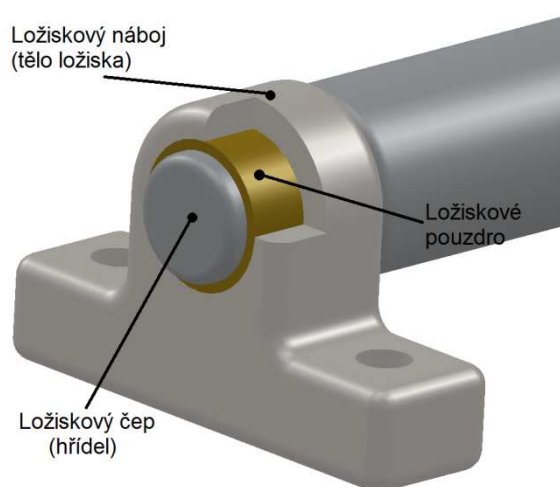
1 Druhy ložisek a jejich použití

Účelem všech ložisek je snížení tření a vymezení vzájemné polohy při vzájemném otáčivém nebo posuvném pohybu strojních dílů. Toho lze dosáhnout různými způsoby a existuje tedy i mnoho různých druhů ložisek, která jsou více či méně vhodná pro použití v konkrétních technických zařízeních. Základní požadavky na ložiska jsou: vysoká účinnost (tedy co nejnižší tření mezi strojními díly), dlouhá životnost, nízká cena a co nejmenší možná velikost. [1, 2]

Ložiska se dají rozdělit do kategorií podle různých kritérií. Podle druhu pohybu (vzájemného uložení dílů) na rotační nebo lineární, podle směru přenášených sil na axiální (přenáší zatížení, která působí převážně ve směru osy hřídele) nebo radiální (zatížení působí převážně ve směru kolmém na osu hřídele) a podle principu jejich funkce. Pro účely této rešerše budou ložiska rozdělena hlavně podle principu jejich funkce. [1, 2]

1.1 Kluzná ložiska

Kluzná ložiska jsou konstrukčně velmi jednoduchá, v podstatě se skládají pouze z ložiskového čepu (části hřídele) a náboje (tělesa ložiska). Mezi čep a náboj se vkládá ložiskové pouzdro (nebo ložisková pánev v případě děleného ložiska) vyrobené z měkčího materiálu než ložiskový čep (bronz, mosaz, plasty...). Toto pouzdro (pánev) pak často lze po skončení jeho životnosti snadno vyměnit. [1, 3, 4]



Obr. 1.1: Součásti kluzného ložiska

Většinou provozní podmínky a materiály pouzdra a čepu neumožňují provoz na sucho (existují i suchá kluzná ložiska, která mají kluznou vrstvu např. z PTFE – teflonu), kluzné plochy mezi čepem a pouzdem se proto musí neustále lubrikovat. Nedostatečné mazání jednak zvyšuje součinitel smykového tření, ale především vede k nadměrnému zahřátí a opotřebení ložiska, v krajním případě pak hrozí i zadření ložiska. [1, 3, 4, 5]

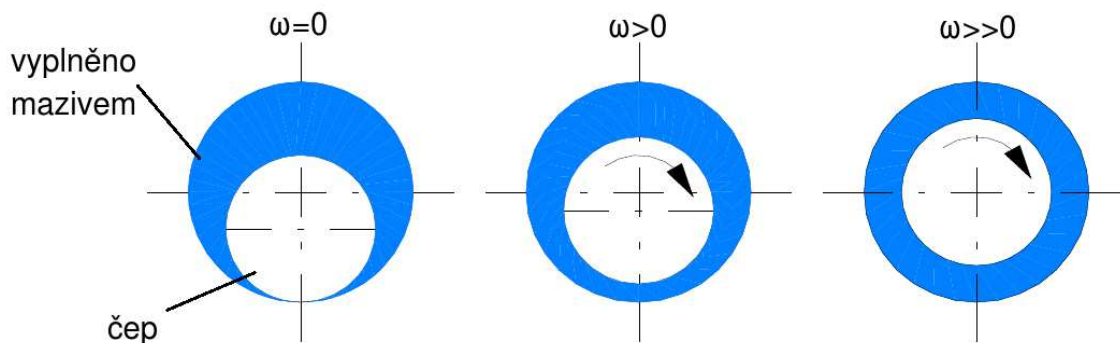
Výhodou kluzných ložisek je jednoduchost jejich konstrukce a jejich bytelnost, z toho pak vyplývá i snadná montáž a dobré zvládnání rázů a přetížení. Další výhodou je jejich tichý provoz oproti valivým ložiskům (zejména při vysokých otáčkách a v hydrostatických/hydrodynamických ložiskách). [1, 3, 4]

Hlavní nevýhoda kluzných ložisek je, že pro svoji funkci využívají smykové tření, díky tomu mají nižší účinnost a více se zahřívají. Tato nevýhoda do značné míry odpadá při použití hydrostatických nebo hydrodynamických ložisek, ve kterých dochází k tzv. kapalnému tření, při němž jsou kluzné části ložiska za provozu neustále odděleny vrstvou maziva. U většiny kluzných ložisek je potřeba věnovat zvláštní pozornost mazání a mají proto i vyšší nároky na údržbu a velkou spotřebu maziva. [1, 3, 4, 5, 6]

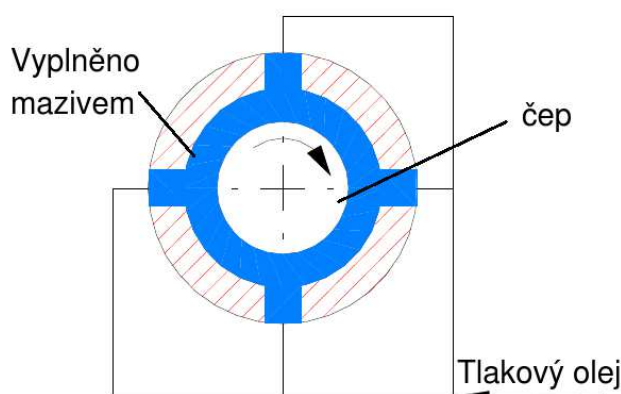
1.1.1 Hydrostatická a hydrodynamická ložiska

Jedná se o speciální druhy kluzných ložisek, ve kterých jsou ložiskový čep a pouzdro od sebe za provozu neustále odděleny souvislou vrstvou maziva. V těchto ložiskách tedy nedochází ke smykovému tření mezi čepem a pouzdem (součinitel tření řádově 0,1-0,25 u suchého tření a 0,01-0,1 u polosuchého tření), ale ke klouzání po vrstvě maziva – tzv. kapalnému tření (součinitel tření řádově 0,001-0,01). [1, 4, 5, 6]

U hydrodynamických ložisek se trvalého oddělení čepu a pouzdra dosahuje vysokými otáčkami, při rozběhu se tedy tyto části dotýkají a dochází mezi nimi ke smykovému tření (obr. 1.2). U hydrostatických ložisek je prostor mezi pouzdem a čepem vyplněn tlakovým olejem, pokud nedojde k přerušení přívodu oleje nebo poklesu jeho tlaku, tak k dotyku strojních částí ložiska nedochází ani při rozběhu. Mazání hydrostatických ložisek (obr. 1.3) zajišťuje oběhové čerpadlo, kvůli tomu je jejich provoz náročnější na údržbu i obsluhu, také ale díky tomu dochází k lepšímu odvodu tepla. [1, 4, 6]



Obr. 1.2: Hydrodynamické ložisko při rozběhu [4]



Obr. 1.3: Hydrostatické ložisko za provozu [4]

1.1.2 Typické použití kluzných ložisek

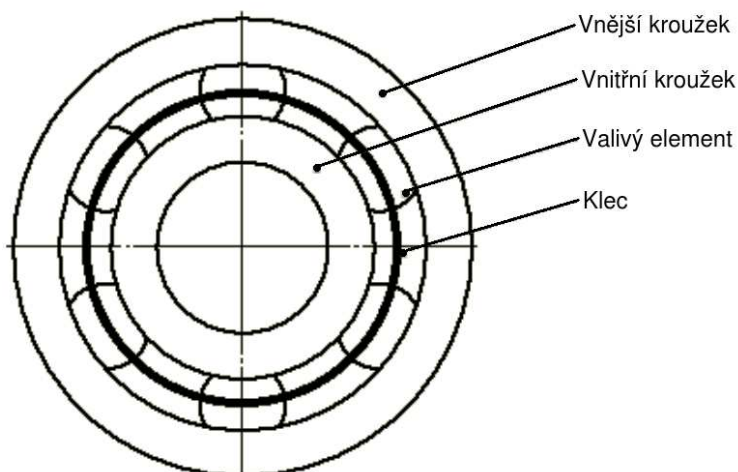
Hydrodynamická kluzná ložiska se používají především u velkých točivých strojů (velké elektromotory, generátory, turbíny...), kde by srovnatelné valivé ložisko bylo výrazně konstrukčně náročnější, větší a dražší. Protože je relativní poloha čepu a pouzdra u hydrodynamických ložisek značně závislá na otáčkách a zatížení hřídele, nehodí se pro použití v obráběcích strojích, kde tuhost uložení ovlivňuje přesnost obrábění. Hydrostatická ložiska pak nacházejí uplatnění hlavně ve velkých obráběcích strojích. [1, 4, 6]

Ostatní kluzná ložiska mají, podobně jako ložiska valivá, široké využití prakticky ve všech průmyslových oblastech, při konkrétním uplatnění je vždy nutno zvážit jejich výhody a nevýhody.

1.2 Valivá ložiska

Jak napovídá jejich název, tento druh ložisek pro svoji funkci využívá valivé tření (valivý odpor), které je výrazně menší než smykové tření. [5]

Rotační valivá ložiska se skládají z vnitřního a vnějšího kroužku, mezi těmito kroužky jsou valivé elementy (kuličky, válečky...), které jsou vedené klecí a pohybují se v oběžných drahách vnitřního a vnějšího kroužku. Valivé elementy přenášejí zatížení a jsou hlavní příčinou snížení tření v uložení. Vnější povrch vnějšího kroužku je spojený s uloženou součástí, vnitřní povrch vnitřního kroužku bývá většinou uložený s přesahem na hřídeli (záleží na tom, jestli rotuje hřídel nebo náboj). Součástí valivých ložisek bývá také těsnění, které v nich zadržuje mazivo a zabraňuje vniknutí nečistot. V závislosti na konkrétním konstrukčním řešení mohou mít valivá ložiska i další součásti, například plechovou krytku. Náčrt konstrukce valivého ložiska je na obrázku 1.4. [1, 7]



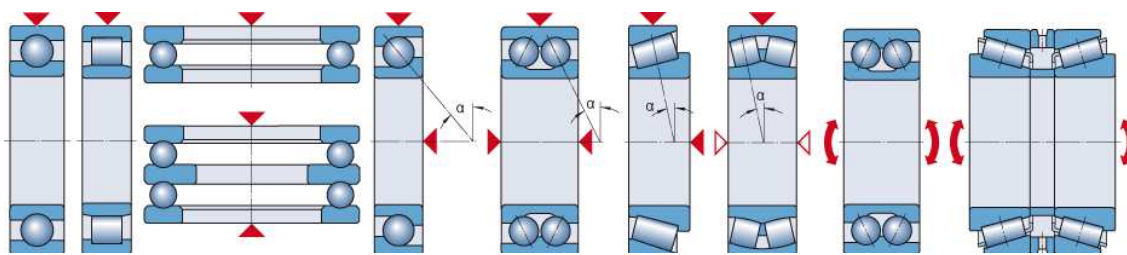
Obr. 1.4: Popis valivého ložiska

Největší výhodou valivých ložisek oproti běžným kluzným ložiskům je vyšší účinnost (valivé proti smykovému tření), proto se také méně zahřívají a jsou vhodná pro větší rychlosti (neplatí u hydrostatických a hydrodynamických ložisek). Další výhodou je, že u valivých ložisek obecně není nutné věnovat zvláštní pozornost mazání (alespoň ne takovou jako u ložisek kluzných), mají tedy i jednodušší údržbu při běžném provozu. Vyrábějí se i zcela uzavřená ložiska s náplní maziva, které vydrží po celou dobu životnosti ložiska.

Nevýhodou valivých ložisek je zejména vyšší hlučnost a netlumené vibrace, také oproti kluzným ložiskům obecně snesou nižší zatížení a rázy a mají složitější montáž.

1.2.1 Rozdělení valivých ložisek

Nejdůležitější rozdělení je podle místa styku valivého elementu s vnitřním a vnějším kroužkem. Tření narůstá s velikostí stykové plochy, ložiska s bodovým stykem (kuličková) proto obecně mají oproti ložiskům s čárovým stykem vyšší účinnost, mají ale také nižší únosnost, protože v místě styku působí větší tlak. Ložiska s čárovým stykem pak mají obecně nižší účinnost a větší únosnost a dále se rozdělují podle tvaru valivých tělísek (válečkové, kuželíkové, jehlové, soudečkové...). Další způsob rozdělení je pak podle druhu zatížení (radiální, axiální, kombinovaná a momentová – obr 1.5). Valivá ložiska se často předepínají (např. pružinami), tím dochází k rovnoměrnějšímu rozložení mechanického napětí mezi všechna valivá tělíska a únosnost celého ložiska se tím zvyšuje. [1, 7]



Obr. 1.5: Ukázka některých valivých ložisek a zatížení na ně působící.[8]

1.3 Vzduchová a magnetická ložiska

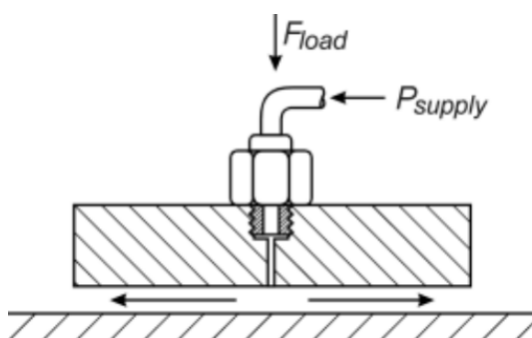
V těchto ložiskách za provozu nedochází k přímému kontaktu strojních částí, díky tomu mají oproti konvenčním ložiskům (valivým a klzným) vysokou účinnost, nízkou hlučnost a dlouhou životnost (nedochází k opotřebení strojních částí). Protože se jedná o bezkontaktní systémy, odpadá také nutnost užití maziv a tím odpadají i všechny omezení spojené s mazivy. Maziva v konvenčních ložiskách se totiž většinou musí regenerovat nebo měnit (čímž vznikají další náklady, např. na ekologickou likvidaci) a jejich vlastnosti jsou závislé na teplotě. [9]

Tyto speciální typy ložisek jsou zde zmíněny jen přehledově. Obsahem této bakalářské práce jsou především poruchy konvenčních ložisek a metody jejich detekce. Problematika diagnostiky vzduchových a magnetických ložisek je nad rámec této rešerše.

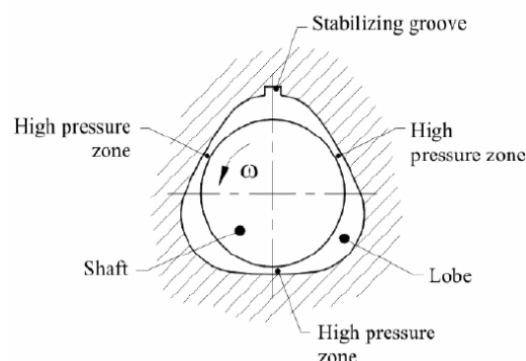
1.3.1 Vzduchová ložiska

Vzduchová ložiska se dělí na aerostatická a aerodynamická, princip jejich funkce je analogický s ložisky hydrostatickými a hydrodynamickými (kapitola 1.1.1), místo kapaliny se ovšem jako mazivo používá stlačený vzduch. U aerostatických ložisek je proto hlavní nevýhoda nutnost přívodu stlačeného vzduchu, u aerodynamických pak nutnost vysoké relativní rychlosti povrchů (tedy nutnost vysokých otáček), protože vzduch má nízkou viskozitu. [9]

Aerostatická ložiska se dají dále rozdělit na aktivní a pasivní (aktivní jsou vybavena zpětnovazebním regulačním obvodem) a nejčastěji se používají lineární aerostatická ložiska (obr 1.6).



Obr. 1.6: Lineární aerostatické ložisko [8]



Obr. 1.7: Aerodynamické ložisko [8]

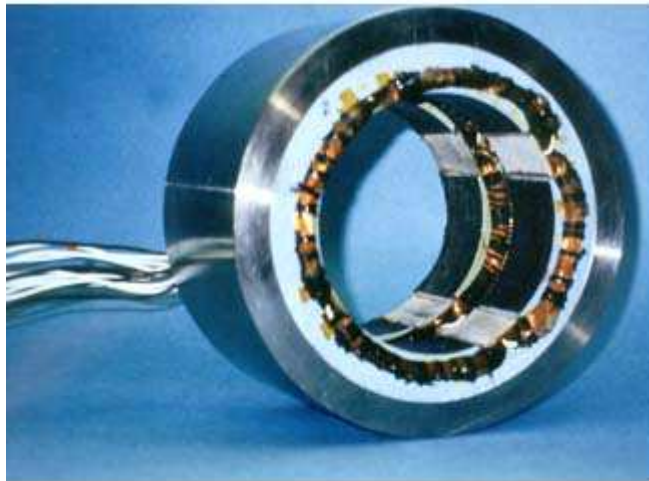
Vzduchová ložiska se obecně využívají hlavně v oblastech, kde je potřeba vysoká přesnost (polohovací systémy, 3D měřicí systémy, počítačové tomografy – CT...) nebo ve strojích které dosahují vysokých otáček (vřetena velmi přesných obráběcích strojů, vysokootáčkové elektromotory). Nejčastější aplikací vzduchového ložiska jsou zapisovací/čtecí hlavy v jednotkách pevných disků v běžných počítačích, kde hlava spolu s otáčející se plotnou tvoří v podstatě aerodynamické ložisko. [9]

1.3.2 Magnetická ložiska

V magnetických ložiskách se bezkontaktního uložení dosahuje využitím principu magnetické levitace. Magnetická levitace je jev, při kterém dochází k vyrušení účinků externích sil na těleso vlivem působení sil magnetických, tím je zajištěna stabilní poloha levitujícího tělesa. [9, 10]

Magnetická ložiska se dají rozdělit na pasivní (využívají permanentních magnetů, velikost působících magnetických sil nelze regulovat, nevyžadují napájení el. proudem) a aktivní (využívají elektromagnetů a zpětnovazební regulace elektrického proudu v jejich cívkách). U ložisek s permanentními magnety vždy musí být jedna z prostorových os zajištěna mechanicky, protože radiální magnetická ložiska s permanentními magnety jsou nestabilní v axiálním směru a naopak – axiální jsou nestabilní ve směru radiálním. [9, 10]

Pasivní mag. ložiska, se využívají na aplikace s menším zatížením (do 100kg), např. setrvačníky s menším výkonem a různé laboratorní zařízení (odstředivky, rentgenové lampy s rotující anodou). Aktivní mag. ložiska mají vyšší únosnost než pasivní a nacházejí uplatnění např. ve výkonných setrvačnicích, v turbokompresorech a turbínách a ve vysokorychlostních obráběcích strojích. [9, 10]



Obr. 1.8: Magnetické ložisko [10]

2 Poruchy ložisek a jejich časté příčiny



Obr. 2.1: Silně poškozený kroužek valivého ložiska [11]

2.1 Mechanické opotřebení materiálu

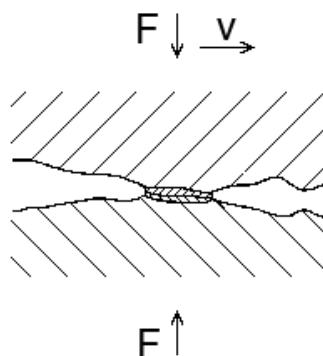
Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, vyvolaná vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává. [11]

Mechanické opotřebení materiálu součástí ložisek vede k vyššímu tření v ložisku a tím pádem k jeho nižší účinnosti a vyšší provozní teplotě. Jde o typický mechanismus ovlivňující délku životnosti konvenčních ložisek. Opotřebení materiálu je nevyhnutelné a při správných provozních podmínkách není příčinou selhání ložiska v rámci jeho životnosti (samozřejmě pokud ložisko nebylo vadné nebo poškozené už před jeho použitím). Různé provozní a montážní faktory ale mohou účinky mechanismů opotřebení urychlit a tím i snížit životnost ložiska.

2.1.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení nastává typicky při smýkání dvou tuhých těles, přitlačovaných k sobě normálovou silou (např. čepu a pouzdra/pánve v kluzném ložisku). Vlivem smýkání obou těles pak dochází k porušování povrchových vrstev materiálu. [11]

Na vznik a průběh adhezivního opotřebení má vliv hlavně hloubka vnikání a poloměr zakřivení povrchových mikronevlností smýkajících se povrchů, velikost zatížení, rychlost relativního pohybu a schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje. V závislosti na intenzitě těchto faktorů pak dochází k různě výraznému opotřebení. [11]

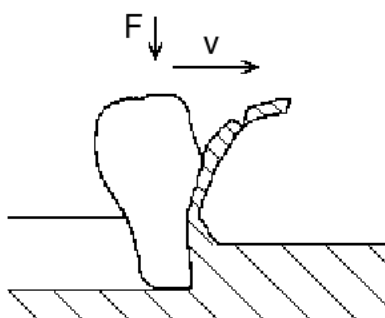


Obr. 2.2: Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [11]

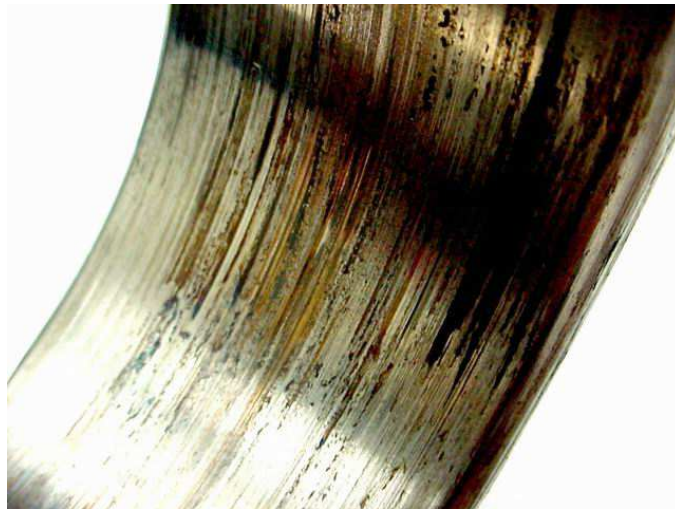
V případě mírného adhezivního opotřebení nedochází k významnějšímu přenosu materiálu mezi povrchy, takto opotřebované povrchy pak jsou hladké, lesklé a bez rýh. V případě výrazného opotřebení dochází ke vzniku adhezivních spojů (svárů na vrcholcích nerovností materiálů) a následnému vytrhnutí materiálu a jeho výměně mezi oběma povrchy, případně ke vzniku volných (otěrových) částic. Rychle vzrůstá odpor proti vzájemnému pohybu a může dojít k zadření. [11]

2.1.2 Abrazivní opotřebení

Jedná se o otěr a oděr materiálu. K abrazivnímu opotřebení dochází buď při vzájemném pohybu a styku dvou drsných a tvrdých materiálů nebo k němu může dojít důsledkem vniknutí cizích (abrazivních) částic jako je písek, prach či kovové piliny mezi tyto dva materiály. Tento proces pak vede ke vzniku dalších otěrových částic. [11]



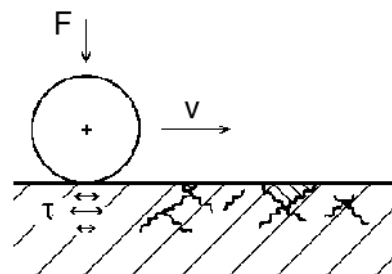
Obr. 2.3: schéma mechanismu abrazivního opotřebení [11]



Obr. 2.4: Výrazné rýhy v pánev kluzného ložiska způsobené adhezivním a abrazivním opotřebením [11]

2.1.3 Únavové opotřebení

Jde o postupnou kumulaci poruch (trhlin) v povrchové vrstvě, které vznikají při silovém, cyklicky opakovaném, styku dvou těles, při kterém se vyskytují vysoké lokální tlaky. K tomu dochází zejména při styku těles se zakřivenými styčnými plochami (např. při styku oběžných drah kroužků a valivých tělísek ve valivých ložiskách). První únavové trhliny vznikají v tenké povrchové vrstvě materiálu. Ty se pak dále rozvíjejí a spojují, až může nastat vylamování částí povrchu (tzv. flaking). [11]



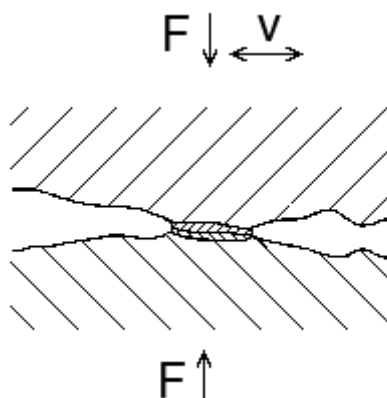
Obr. 2.5: Schéma mechanismu únavového opotřebení [11]

Častým příznakem únavového opotřebení je tvoření důlků (tzv. pitting), obvykle okrouhlého tvaru, ovšem u povrchů s vysokou tvrdostí (valivá ložiska) mohou mít důlky i hranatý nebo protáhlý tvar. Na jejich vzniku se význačně podílí mazivo. Účinkem kontaktních tlaků vniká mazivo do povrchových trhlin, v důsledku dalšího pohybu součástí je v nich uzavíráno a jeho tlak se účinkem kontaktního namáhání zvyšuje. To přispívá k dalšímu šíření trhlinek a vede až ke vzniku zmíněných důlků. [11]

2.1.4 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení (tzv. fretting) je charakterizováno oddělováním částic materiálu v místech kmitavých posuvů funkčních ploch při jejich současném zatížení normálovými silami. Na průběh a intenzitu vibračního opotřebení má vliv zejména amplituda a frekvence pohybu, měrný tlak ve styku součástí a vlastnosti materiálu. Vibrační opotřebení vzniká především tehdy, je-li amplituda pohybu větší, než může být vyrovnáno pružnými deformacemi povrchů. [11]

Fretting typicky vzniká ve valivých ložiskách, která jsou vystavená vibracím, když nejsou v provozu. Poškození je pak patrné v místě styku valivých elementů a kroužků.



Obr. 2.6: Schéma mechanismu vibračního opotřebení [11]

Při malých amplitudách vibrací (10^{-4} až 10^{-1} mm) je znemožněno odstraňování otěrových částic. Tyto částice jsou pak dále namáhány, a díky jejich relativně velkému povrchu vzhledem k jejich objemu rychle oxidují, tím dodávají opotřebovaným místům typické hnědočervené až hnědočerné zbarvení. Jde o tzv. "krváčení materiálu" (viz obr. 2.7). K oxidaci nedojde, pokud je místo opotřebení chráněno vrstvou maziva před přístupem kyslíku. [11]



Obr. 2.7: Kroužek valivého ložiska poškozený vibracemi [11]

2.2 Koroze

Koroze je nežádoucí trvalá změna povrchu materiálu, způsobená elektrochemickými vlivy okolního prostředí. [11]

Korozní napadání ložisek většinou způsobuje vlhkost a sůl v okolním prostředí. Materiály ložisek provozovaných v korozních prostředích by měly vykazovat vysokou odolnost vůči danému typu koroze, nebo musí být citlivé povrchy součástí ložisek dobře izolovány od vlivů okolního prostředí (těsněním a mazivem). Důsledkem koroze je mj. i urychlení procesů mechanického opotřebení ložisek.

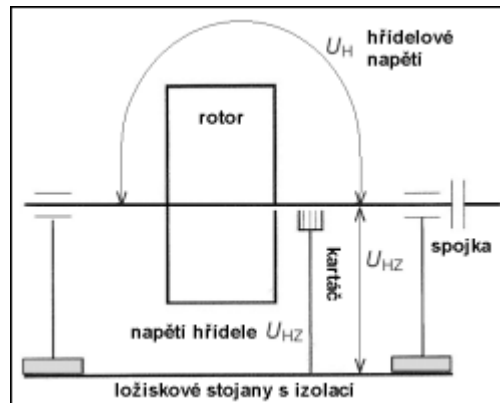
2.3 Rázy a přetížení

Příliš velké rázy a přetížení mohou způsobit plastické deformace, otlaky v povrchu, trhliny a lomy v součástech ložisek. Rázy vznikají buď vnějším zásahem (např. poruchou stroje, která nesouvisí s ložiskem), nebo v důsledku dřívějšího poškození funkčních ploch ložiska jinými faktory (korozí, mechanickým opotřebením nebo průchodem ložiskových proudů). [11]

2.4 Elektrické opotřebení ložisek a ložiskové proudy

Za elektrické opotřebení ložisek je považováno opotřebení ložisek způsobeno trvalým průchodem el. proudu ložiskem (čistě elektrické opotřebení), jiskrovými a obloukovými výboji (elektroerozivní opotřebení) a působením elektrochemických dějů v ložisku (elektrolytické opotřebení). Působení el. proudu a výbojů zahřívá ložisko, teploty mohou lokálně dosáhnout velmi vysokých hodnot, dostatečných ke změkčení nebo dokonce roztavení materiálu. [12, 13]

Příčinou vzniku proudů tekoucích ložiskem je vznik elektrického napětí U_H , které se objeví mezi konci hřídele, nebo napětí U_{HZ} mezi hřídelí a zemí (tyto napětí jsou naznačena na obr 2.8). Vznik hřídelových napětí má různé příčiny, nejčastěji vzniká z důvodu nesymetrie elektrického nebo magnetického obvodu elektrického stroje, tyto nesymetrie pak vyvolávají pulsaci magnetického toku, který pak indukuje v hřídeli napětí. Pokud jsou tato napětí dostatečně vysoká může dojít k průchodu el. proudu ložiskem a ke vzniku jiskření nebo obloukových výbojů. [12, 13]



Obr. 2.8: Naznačení hřídelových napětí [12]

Častou příčinou vzniku nesymetrií je použití statických měničů v regulačních pohonech, typicky při napájení asynchronních motorů z měničů frekvence. [12, 13]

Ve valivých ložiskách proud protéká obvodem, jehož částí je vnější kroužek, valivé tělísko a vnitřní kroužek, poškození nastává v místech styku valivých tělísek a oběžných drah kroužků. U kluzných ložisek proud narušuje výstelky ložiskových pánví a hřídelí. Průchod el. proudem ložiskem může také narušovat vlastnosti maziva. [12, 13]



Obr. 2.9: Typický vzor vznikající na kroužku valivého ložiska při poškození el. proudem (tzv. fluting) [13]

2.5 Časté příčiny předčasného selhání ložisek

Selhání ložisek jsou spojena s mechanickými nestabilitami, často způsobenými předchozím poškozením ložiska. Mechanismy vzniku poškození jsou popsány výše v kapitolách 2.1, 2.2, 2.3 a 2.4 (jedná téměř vždy o kombinaci dvou nebo více těchto vlivů). Projevem těchto poškození bývají zvýšené vibrace a zvýšená hlučnost a teplota ložisek, na základě analýzy těchto projevů pak lze provést diagnostiku ložisek za provozu. Mezi časté příčiny předčasného selhání ložisek patří [14]:

2.5.1 Nedostatečná lubrikace

- Zvyšuje tření, tím snižuje účinnost a zvyšuje teplotu ložiska.
- Urychluje procesy mechanického opotřebení materiálu. Zejména u kluzných ložisek dochází k adhezivnímu opotřebení a v jeho krajním případě k zadření ložiska.
- Zvyšuje riziko koroze.
- Usnadňuje průchod ložiskových proudů, mazivo totiž funguje i jako elektrický izolant funkčních povrchů ložiska.

2.5.2 Vadné těsnění

Umožňuje vnik abrazivních částic a korozních vlivů prostředí k funkčním plochám ložiska, Dále může způsobit i únik maziva a následně nedostatečnou lubrikaci ložiska (viz 2.5.1).

2.5.3 Špatná montáž

Týká se hlavně valivých ložisek. Příliš volné upevnění hřídele v otáčejícím se (většinou vnitřním) kroužku ložiska může vést k jejímu prokluzování. Následkem prokluzování je snížení účinnosti, produkce tepla a urychlení opotřebení. Příliš těsné upevnění hřídele nebo příliš velké předepnutí valivých elementů způsobuje vyšší zatížení působící na valivé elementy a kroužky a urychluje procesy opotřebení (zejména únavové opotřebení).

2.5.4 Nezamezení průchodu proudu ložiskem

Ložiskové proudy jsou popsány v kapitole 2.4. Možnosti zamezení vzniku ložiskových proudů jsou [15]:

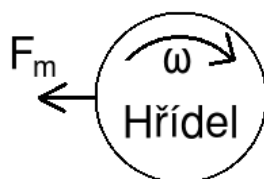
- Odstranění všech nesymetrií elektrického i magnetického obvodu již při návrhu a konstrukci.
- Správná montáž zařízení (vhodný napájecí kabel a zemnicí systém).
- Sinusový průběh napájecího napětí – použití filtrů při napájení z měničů.
- Preventivní prostředky a konstrukční úpravy jako je izolace ložisek a ložiskových stojanů, použití nevodivých ložisek (keramických nebo hybridních), připojení uzeměného kartáče na hřídel.

2.5.5 Nerovnoměrné zatížení a jednostranný magnetický tah

Například ohnutá nebo naklonená hřídel způsobuje nerovnoměrné zatížení působící po obvodu ložiska a zatížení částečně působící ve špatném směru (radiální zatížení u ložisek axiálních a axiální zatížení u ložisek radiálních). Dalším příčinou nerovnoměrného zatížení ložiska je jednostranný magnetický tah působící na hřídel. Důsledkem nerovnoměrných zatížení je zrychlení průběhu mechanismů opotřebení ložiska.

Točivý moment na hřídeli v elektrických strojích vzniká díky vytvoření tečných sil, působících po obvodu hřídele. Tyto síly vznikají díky vzájemnému působení magnetických polí statoru a rotoru. V ideálním případě je vzduchová mezera mezi státorem a rotorem po celém obvodu konstantní a tím pádem jsou i všechny tečné síly stejně velké a jejich výslednice je tedy nulová. Ve skutečnosti však velikost vzduchové mezery po obvodu konstantní nebývá a tečné síly se nevyruší, výslednice těchto sil se nazývá magnetický tah F_m (obr 2.10). [16]

Příčiny variabilní velikosti vzduchové mezery mohou být například výrobní tolerance, geometrické odchylky od ideálního válcového tvaru statoru a rotoru, nepřesné (excentrické) uložení rotoru a špatně vyvážená nebo prohnutá hřídel. [16]



Obr. 2.10: Magnetický tah F_m působící na hřídel

3 Metody detekce poruch

Poškozená ložiska snižují účinnost strojů a jejich selhání může mít za následek další škody na jiných částech stroje a následné náročné opravy, proto je v ekonomickém zájmu provozovatele stroje včasná diagnóza závad ložisek.

Diagnostika stavu ložisek za provozu se provádí na základě měření a analýzy jejich provozních parametrů (jejich vibrací, teploty a akustických emisí). U výrazně poškozených ložisek lze často závadu v ložisku stroje rozpoznat lidskými smysly (tedy metodou „pohled, poslech a dotyk“), v takovém případě ale už může být příliš pozdě a vždy je lepší na poškození ložiska přijít už v jeho začátcích (kvůli případnému poškození jiných částí stroje i z hlediska naplánování údržby).

3.1 Detekce poruch kluzných ložisek

Vývoj některých poruch kluzných ložisek je otázkou pouze minut nebo sekund (například adhezivní opotřebení až zadření vlivem poruchy mazání). Pravidelným kontrolám stavu kluzných ložisek za provozu se proto nevěnuje taková pozornost jako u ložisek valivých.

Správně uložená a provozovaná kluzná ložiska nejsou výrazným budičem vibrací, akcelerometry umístěné na ložiskovém tělese by navíc měřily přenos vibrací hřídele přes vrstvu maziva a několik metalických přechodů, proto je složité z takto umístěných snímačů získat relevantní údaje. Pro detekci problémů kluzných ložisek lze použít bezkontaktní snímač výchylky vibrací, který měří relativní vibrace mezi tělem ložiska a čepem (hřídelí). [17]

Pro detekci závad kluzných ložisek lze také použít metody založené na základě analýzy akustických emisí (viz 3.5.3). [17]

3.2 Vibrační diagnostika

Základním principem vibrační diagnostiky ložisek je skutečnost, že jakékoliv poškození ložiska vede při jeho provozu k určitým vibracím. Vibrace zkoumaného ložiska jsou porovnávány s vibracemi nepoškozeného ložiska, u poškozených ložisek lze v časové oblasti pozorovat vyšší efektivní hodnotu (RMS) vibrací, vyšší hodnoty extrémů a jiné časové rozložení extrémů. Ve frekvenční oblasti lze pozorovat vyšší amplitudy ve spektru vibračního signálu. Na základě těchto údajů se určí povaha, umístění i závažnost poruchy. Vibrační analýzou je možné detekovat a lokalizovat i velice malá poškození ložisek (první známky jejich opotřebení), pravidelná kontrola ložisek metodami vibrační analýzy proto poskytuje cenné informace z hlediska plánování údržby. [17, 18]

Měření vibračního signálu se provádí vhodně umístěnými snímači (viz 3.2.1), které převádějí mechanické vibrace na elektrický signál (typicky např. akcelerometry s piezoelektrickými krystaly, které převádějí vibrace na odpovídající signál napětí). Tento signál je poté přiveden datovými kabely do přenosného digitálního měřicího přístroje a je dále zpracováván. V závislosti na požadavcích a konkrétní metodě vibrační analýzy je omezen frekvenční rozsah signálu (zapojením s filtry) a signál je zpracováván různými matematickými operacemi (např. FFT – viz 3.2.3). [17, 18]

3.2.1 Vhodné umístění snímače

Pro určení vhodného měřicího místa je potřeba znát směr největšího zatížení ložiska. V poškozeném valivém ložisku vznikají nejsilnější impulsy v zatížené oblasti a odtud jsou přenášeny na skříň ložiska. Impulsy se nejlépe šíří v tzv. emisním okně ložiska, které je u radiálních ložisek pod úhlem $\pm 45^\circ$ od směru zatížení ložiska, u axiálních ložisek je zatížení rozloženo po celém obvodu kotouče skříně. [17]

Snímač se musí umístit v emisním okně ložiska a jeho hlavní osa musí směřovat přímo na osu zatížení ložiska. Dále mezi cestou signálu smí být jen jedno přerušení materiálu (mezi ložiskem a ložiskovým tělesem) a směr dráhy signálu mezi ložiskem a snímačem musí být přímý a průchozí. [17]

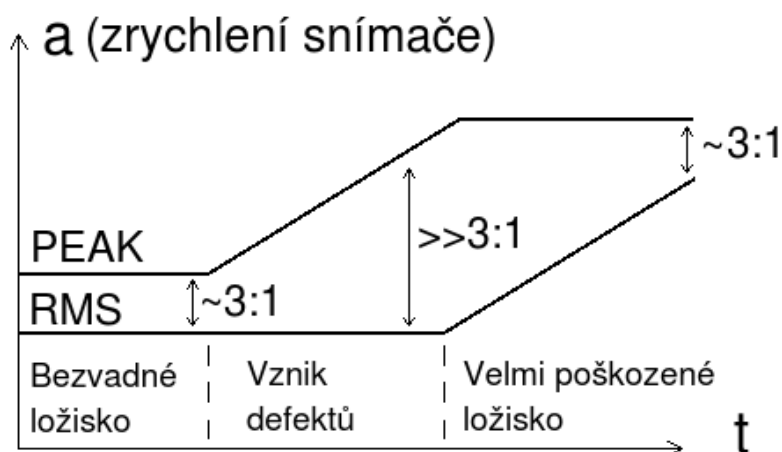
3.2.2 Analýza vibrací v časové oblasti

V časové oblasti se detekce poruch a jejich analýza provádí na základě statistických parametrů časového průběhu vibrací, např. jejich efektivní hodnoty, velikosti extrémů a náhodnosti jejich výskytu. [18]

Periodický výskyt vysokých špičkových hodnot indikuje vznik lokální (bodové) poruchy v ložisku (prasklinka, pitting), efektivní hodnota vibrací je úměrná energii vibrací (vyšší RMS indikuje závažnější poškození ložiska). Mezi další statistické metody používané při analýze časového průběhu vibrací patří např. Crest factor (viz 3.2.2.1) a Kurtosis (Jde o posouzení statistického rozdělení špičkových hodnot vibrací vzhledem k normálnímu, Gaussovskému, rozdělení, které očekáváme u bezvadného ložiska). [18]

3.2.2.1 Crest factor

Tzv. činitel výkmitu, jde o poměr špičkové a efektivní hodnoty vibrací (PEAK/RMS), tento parametr výrazně narůstá v době vzniku mechanického opotřebení (v důsledku nárůstu špičkových hodnot), při pokročilém poškození pak zase klesá (obr 3.1). Vysoký crest factor může indikovat kromě začínajícího mechanického opotřebení také poruchu v mazání. Protože se jedná jen o poměr dvou hodnot, crest factor je zcela nezávislý na typu ložiska i na otáčkách hřídele. [18, 19]



Obr. 3.1: Vývoj činitele výkmitu za životnost ložiska

Tato metoda dává jenom hrubou orientaci o stavu ložiska a je náchylná k ovlivnění vlivem jiných zdrojů zrychlení než je porucha ložiska. Jde ale o velmi jednoduchou metodu, vyžaduje v podstatě jen snímač a běžný osciloskop.

3.2.3 Fourierova transformace

Fourierova transformace slouží pro převod časově závislého signálu do frekvenční oblasti, inverzní Fourierova transformace pak slouží pro převod frekvenčně závislé funkce na časově závislou funkci. Fourierovou transformací získáváme spektrum signálu. [20]

Fourierova transformace ve spojitém čase (FT) a její inverze (IFT):

$$\text{FT: } X(\omega) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \omega = 2\pi f \quad (1)$$

$$\text{IFT: } x(t) = F^{-1}[X(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

- $X(\omega)$ Fourierův obraz časového signálu
- $x(t)$ časový signál
- $\omega(t)$ úhlová frekvence

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) a její inverze (IDFT):

$$\text{DFT: } X^f[f] = X^f[k_f \Delta f] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i)e^{-jk_f i \frac{2\pi}{N}} \quad (3)$$

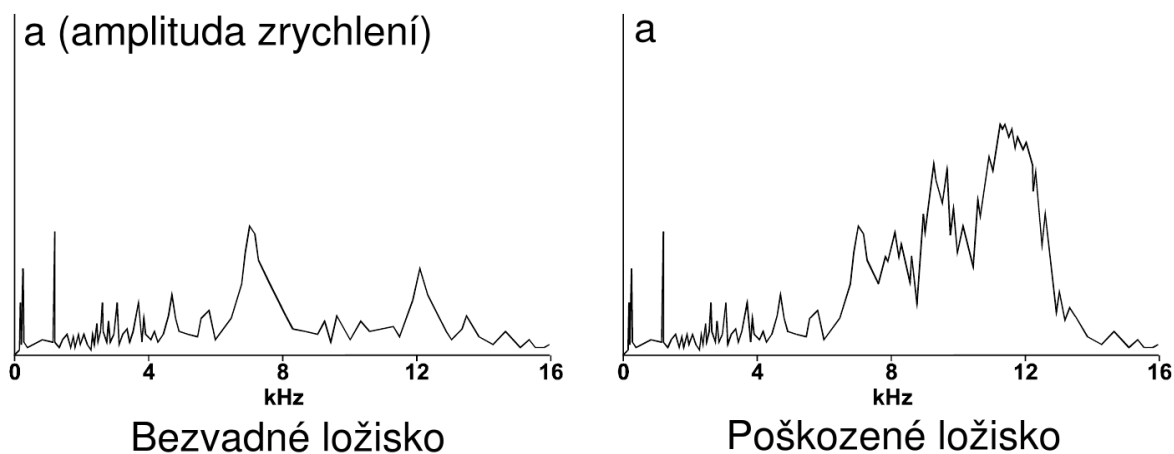
$$\text{IDFT: } x(i) = \Delta f \sum_{i=0}^{N-1} X^f(i)e^{jk_f i \frac{2\pi}{N}} \quad (4)$$

- $X^f[k_f]$ Fourierův obraz analyzovaného signálu
- $x(i)$ jednotlivé vzorky časového signálu ($i = 0, 1, \dots, N - 1$)
- k_f k -tá složka transformovaného signálu ($k_f = 0, 1, \dots, N - 1$)
- Δf krok, kterým je rozdělena frekvenční osa (frekvenční rozlišení)
- $f = k_f \Delta f$ odpovídající frekvenční obraz dané složky signálu

Pro urychlení výpočtu se v měřicích přístrojích používá algoritmus rychlé fourierovy transformace (FFT – fast Fourier transform), která vyžaduje méně aritmetických operací než FT a její výpočet je proto rychlejší.

3.2.4 Analýza vibrací ve frekvenční oblasti

Při začínajícím poškození ložiska narůstá energie vibrací ve vyšších frekvencích a při pokročilém poškození pak narůstá energie i u frekvencí nižších. Na základě porovnání spekter vibračního signálu nepoškozeného a zkoumaného ložiska provozovaných za stejných podmínek lze zjistit poškození ložiska, z tohoto srovnání ale nelze zjistit povahu poškození, proto se provádí tzv. metoda obálkové analýzy. [18, 19]



Obr. 3.2: Porovnání spektra vibrací bezvadného ložiska s poškozeným [19]

3.2.4.1 Obálková analýza (envelope spektrum)

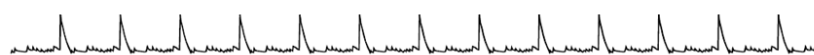
Vychází se z toho, že každá část valivého ložiska má předem danou relativní rychlost vůči hřídeli. Valivá ložiska proto produkují vibrace o čtyřech základních frekvencích, které se dají spočítat na základě rozměrů ložiska a rychlosti otáček. Jde o poruchovou frekvenci vnitřního kroužku, vnějšího kroužku, klece a valivých tělísek. Frekvence rázů vznikajících důsledkem poruchy v ložisku odpovídají těmto základním frekvencím, nebo jsou jejich celočíselnými násobky. Výhodou tohoto přístupu je, že lze velmi brzy získat informace o vzniku lokální poruchy ve valivém ložisku a o jejím rozvoji, dále lze určit, které části ložiska se porucha týká. [17, 18, 19]

Vibrační signál kromě základních frekvencí ložiska samozřejmě obsahuje i jiné frekvence, které souvisejí s provozem stroje. Nejprve je proto časový signál vibrací zpracován pásmovou propustí, která odfiltruje nežádoucí frekvence a tím zvýrazní rázové pulzy vzniklé poškozením ložiska. Poté se získá obálka tohoto signálu pomocí usměrnění signálu a následné filtrace přes dolní propust (obr. 3.3). Posledním krokem je získání spektra obálky pomocí FFT (obr. 3.4). [17, 18, 19]

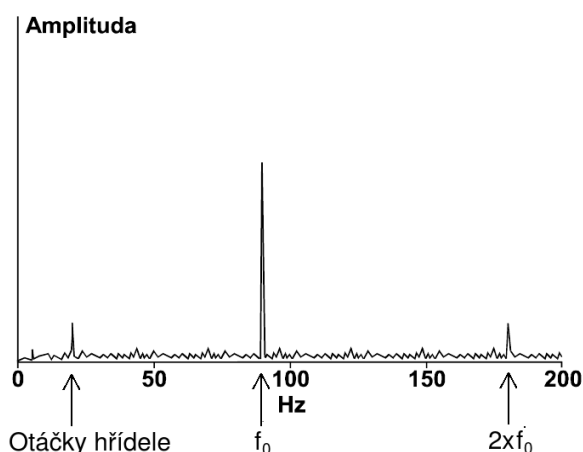
Signál vibrací po filtraci:



Obálka signálu:



Obr. 3.3: Obálka signálu [19]

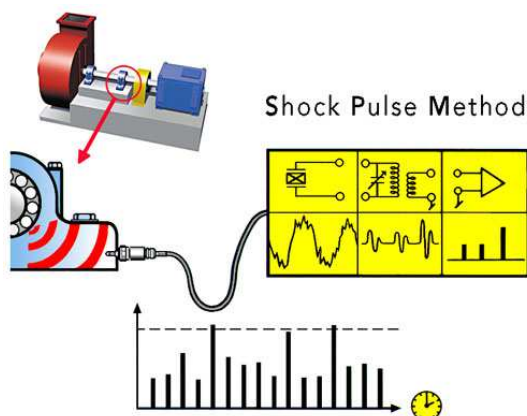


Obr. 3.4: Spektrum obálky signálu, f_0 zde značí základní poruchovou frekvenci vnitřního kroužku [19]

3.3 Metoda rázových pulsů (SPM)

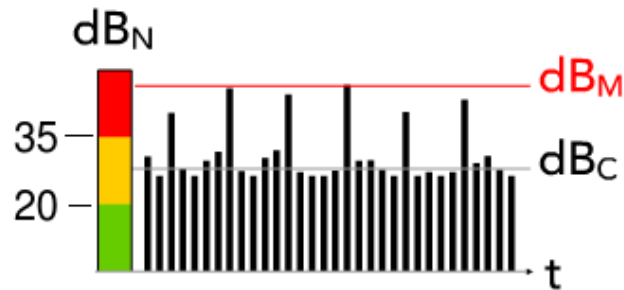
SPM (Shock Pulse Method) je metoda diagnostiky valivých ložisek patentovaná společností SPM instrument. Tato metoda vychází z poznatku, že při nárazu kovu na kov vznikají rázové pulsy (krátkodobé tlakové vlny) o frekvencích kolem 30-40 kHz. Tyto rázové pulsy mají v ložisku relativně malou amplitudu a rychle se rozptylují. Pro zachycení rázových pulzů se proto používají speciální akcelerometry, jejichž piezoelektrický krystal má vlastní rezonanční frekvenci 36 kHz, v měřicím přístroji se pak signál z akcelerometru filtruje pásmovou propustí se střední frekvencí pásma kolem 36 kHz a nakonec se ze získají jednotlivé rázové pulsy. Tento proces je naznačen na obrázku 3.5. [17, 21]

Měřicí přístroj SPM měří četnost výskytu rázových pulzů (počet rázových pulzů za sekundu) a mění minimální hodnotu amplitudy pulzu potřebnou pro jeho detekci tak dlouho až získá dvě hodnoty. Jde o shock carpet level (značený dB_C , jde o průměrnou velikost amplitudy při detekci přibližně 200 pulzů za sekundu) a maximum level (značený dB_M , jde o maximální amplitudu pulzu v intervalu dvou sekund). [21]



Obr. 3.5: Princip měření metodou SPM [21]

Pro zobrazení hodnot dB_C (decibel carpet value) a dB_M (decibel maximum value) se používá logaritmické měřítko, protože jejich velikost se obvykle řádově liší. Zvýšení hodnoty dB_C často poukazuje na problémy s mazivem, vysoká hodnota dB_M poukazuje na začínající poškození ložiska. [21]



Obr. 3.6: Zobrazení hodnot dB_M a dB_C a jejich porovnání s dB_N [21]

Pro správné vyhodnocení hodnot dB_M a dB_C se tyto hodnoty musí porovnat s normovanou veličinou dB_N . [21]

$$dB_N = \frac{dB_M}{dB_C} - dB_i \quad (5)$$

$$dB_i = 20(\log(n) + 0.6\log(D) - \log(2150)) \quad (6)$$

Hodnota dB_i je počáteční hodnota, stanovená na základě průměru hřídele D [mm] a na základě otáček hřídele n [ot/s]. Tato hodnota se stanovuje kvůli zahrnutí vlivu rychlosti otáček na měření, té je totiž úměrná relativní rychlost nárazu při přejezdu valivých těles přes poruchu, tato rychlost pak ovlivňuje velikost amplitudy rázových pulzů. Velikost amplitudy pulzů je kromě rychlosti závislá ještě na tloušťce vrstvy maziva a samozřejmě také na závažnosti poruchy ložiska. Při měření metodou SPM proto musí být známy přesné parametry ložiska a měření musí probíhat při konstantních otáčkách. [17, 21]



Obr. 3.7: Přenosný přístroj „bearing checker“ společnosti SPM [25]

3.4 Termografie

Zvýšené provozní teploty ložiska indikují jeho poruchu. Teplotu lze měřit kontaktními nebo infračervenými teploměry, u obou těchto metod měření ale musí být uživatel v bezprostřední blízkosti měřeného místa, a to často z různých důvodů (především bezpečnostních) není možné. Pro měření teploty je proto výhodné použít termovizní kameru, ta reprezentuje infračervené spektrum elektromagnetického záření jako různé barvy viditelného spektra nebo jako odstíny šedi na displeji. Termovizní kamera umožňuje rychlé porovnání teplot na velké ploše a okamžitě lze poznat, jestli je teplota ložiska v přípustných mezích. [22]



Obr. 3.8: Obraz displeje termovizní kamery [22]

Výhodou termografie je, že jde o bezkontaktní a neinvazivní kontrolní metodu, která je rychlá a jednoduchá (nevyžaduje zvláštní znalosti pro správné vyhodnocení obrazu termovizní kamery). Nevýhoda je, že tato metoda poskytuje jen velmi limitované informace o stavu ložiska (na rozdíl od SPM a vibrační diagnostiky, především obálkové analýzy). Pomocí termografie nelze identifikovat povahu ani příčinu poruchy a její závažnost lze na základě změřené teploty jen odhadnout.

3.5 Další metody detekce poruch

3.5.1 Monitorování statorového proudu

Možnost detekce poruch ložisek analýzou statorového proudu je z ekonomického hlediska velmi lákavá, tento přístup nevyžaduje přítomnost kontaktního snímače na ložisku a vše potřebné lze zjistit pouze měřením elektrických veličin. Složky proudu vybuzené v důsledku poruchy ložiska jsou vzhledem k dominantním složkám proudu statoru velmi malé, je ale experimentálně prokázáno, že lze tyto složky izolovat. Detekce poruch ložisek monitorováním statorového proudu se zatím v běžné praxi moc nepoužívá, dá se ale očekávat, že v budoucnu bude tento přístup aplikován častěji. [23]

3.5.2 Hluková diagnostika

Zvýšení provozního hluku ložiska se objevuje až při jeho velmi špatném stavu. Měření obyčejným měřičem akustického tlaku (hlukoměrem) proto nelze použít pro včasnou diagnostiku stavu ložiska, jde ale o nekontaktní jednoduchou metodu, kterou lze v praxi rozpoznat vážný stav ložiska.

3.5.3 Akustické emise (AE)

Akustická emise je fyzikální jev, při kterém dochází k uvolnění nahromaděné elastické energie v materiálu. Tato energie je vyvolána v důsledku dynamických procesů v materiálu (plastická deformace, tření, rázy...) a dále se šíří v podobě mechanického napěťového impulzu jako elastická napěťová vlna. Složky vln kolmé k povrchu součásti vytváří napěťové vlny na povrchu, a ty je možné detekovat piezoelektrickými snímači akustické emise. Běžný frekvenční rozsah měření akustických emisí se pohybuje mezi 100kHz až 4MHz. Jako „AE“ se neoznačuje pouze uvedený fyzikální jev ale i metoda diagnostiky založená na jeho měření. [24]

V případě diagnostiky ložisek je měření akustických emisí poměrně nový přístup. Výhodou i nevýhodou této metody je její velká citlivost – lze odhalit i velmi malá poškození funkčních ploch ložiska (menší než u vibrační diagnostiky), AE je ale také velmi náchylná k rušení a může být složité nalézt požadované informace ve značném šumu okolních provozních podmínek. [24]

3.6 Srovnání uvedených metod diagnostiky

Obecně lze konstatovat, že bezdemotážní metody diagnostiky méně náročné z hlediska přístrojového vybavení, podmínek měření a kvalifikace obsluhy (vyhodnocení naměřených údajů) poskytnou méně přesné informace o stavu ložiska.

Nejjednodušší je měření hluku a teploty, stačí jen hlukoměr nebo teploměr (termovizní kamera) a měření lze provést bezkontaktně. Změřením hluku a teploty ale lze přijít jen na vážné poškození ložisek a pro včasnou detekci poruch je proto tento přístup nepoužitelný. Běžně používané metody pro včasnou detekci zhoršujícího se stavu ložiska využívají většinou metody vibrační diagnostiky, případně SPM. Méně časté metody včasné detekce poruch jsou pak založeny na analýze statorových proudů nebo na měření

vysokofrekvenčních akustických emisí, v budoucnu však lze očekávat větší rozšíření těchto metod.

Společnost SPM Instrument nabízí mj. i kapesní přístroj „bearing checker“ specializovaný na diagnostiku valivých ložisek, měření tímto přístrojem je rychlé a snadné, v podstatě stačí přiložit přístroj na těleso ložiska a za pár sekund známe jeho stav. Nevýhodou použití metody SPM je, že pro získání jakýchkoliv relevantních informací musíme znát přesné parametry ložiska a musíme měřit při konstantních otáčkách.

Na trhu jsou dostupné také přenosné přístroje využívající metody vibrační diagnostiky např. od firem ADASH a SKF. Pokud takový přístroj není k dispozici lze některé metody vibrační diagnostiky aplikovat i pomocí nespécializovaných měřicích přístrojů, což u metody SPM není možné (například pro změření crest faktoru stačí snímač, nábojový zesilovač a osciloskop). Vždy je ale lepší (a jednodušší) použít specializovaný přístroj, tyto přístroje mají většinou integrované vše potřebné pro měření (vlastní snímač, nábojový zesilovač, filtry, A/D převodník, matematické algoritmy pro analýzu signálu...), jsou schopny analyzovat časový průběh i spektrum signálu a na místě určit stav ložiska, často ale mají i možnost zobrazení průběhů nebo exportování naměřených dat do počítače pro možnost jejich podrobnějšího zkoumání.



Obr 3.9: Přístroj pro vibrační diagnostiku ADASH A4300 VA3 Pro [26]



Obr. 3.10: Přístroj „bearing checker“ od společnosti SPM Instrument [25]



Obr. 3.11: Přístroj pro vibrační diagnostiku CMAS 100-SL od společnosti SKF [27]

Závěr

V této rešerši byly uvedeny druhy ložisek používaných v elektrických strojích a byl stručně popsán princip jejich funkce. Dále byly popsány základní mechanismy vzniku poruchy konvenčních ložisek v el. strojích a provozní faktory, které tyto mechanismy urychlují. Vysvětleny byly také principy některých běžně používaných metod bezdemontážní diagnostiky ložisek, především metod založených na měření vibrací, a bylo provedeno jejich stručné porovnání, zejména s ohledem na náročnost přístrojového vybavení. Zmíněny byly také v praxi zatím méně časté přístupy k bezdemontážní diagnostice ložisek, jako je monitorování statorových proudů a měření vysokofrekvenčních akustických emisí.

Vibrační diagnostika je zdaleka nejčastější přístup používaný pro včasnou detekci vznikajících poruch v ložisku, lze ovšem očekávat, že v budoucnu se dočkají většího rozšíření i další metody. V posledních letech se objevilo mnoho studií zabývajících se diagnostikou ložisek monitorováním statorového proudu, tento přístup je výhodný protože se měří pouze elektrické veličiny a není potřeba použít kontaktní snímač na ložisku, proto očekávám v blízké budoucnosti větší rozšíření této metody v praxi.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HOSNEDL, Stanislav. *Obecné strojní části 1*. Západočeská univerzita v plzni, 2012. ISBN 978-80-261-0125-3
- [2] Wikipedia contributors. *Bearing (mechanical)* [Online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. c2016, poslední změna 12.05.2016 [cit. 16.05.2016]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bearing_\(mechanical\)&oldid=719856845](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bearing_(mechanical)&oldid=719856845)
- [3] Wikipedia contributors. *Plain bearing* [Online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. c2016, poslední změna 02.04.2016 [cit. 20.05.2016]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plain_bearing&oldid=713119745
- [4] PALÁT, Hynek. *Kluzná ložiska*. OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost, 2011. Pdf dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablon/SPS_II/VY_32_INOVACE_C-07-16.pdf
- [5] Příspěvatelé Wikipedie. *Tření* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. c2015, poslední změna 10.11.2015 [cit. 20.05.2016]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C5%99en%C3%AD&oldid=13034785>
- [6] Wikipedia contributors. *Fluid bearing* [Online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. c2016 poslední změna 25.04.2016 [cit. 20.05.2016]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fluid_bearing&oldid=717052462
- [7] Wikipedia contributors. *Rolling-element bearing* [Online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. c2016, poslední změna 21.04.2016 [cit. 20.05.2016]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rolling-element_bearing&oldid=716382325
- [8] SKF group. *Zatížení ložisek* [obrázek]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/bearing-basics/basic-selection-criteria/loads/index.html>
- [9] PESLAR, Jiří. *Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Pdf dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647
- [10] Wikipedia contributors. *Magnetic bearing* [online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. c2016, poslední změna 22.05.2016 [cit. 23.5.2016]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetic_bearing&oldid=721542967
- [11] POŠTA, J., VESELÝ, P., DVORÁK, M. *Degradace strojních součástí* [monografie]. Praha, ČZU, 2002. 67 s. ISBN 80-213-0967-9.
- [12] CHMELÍK, Karel a SOJKA, Jaroslav. *Ložiskové proudy a jejich degradační působení*. Časopis elektro 8/2003. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25552
- [13] BOYANTON, H. E., HODGES, G., *Bearing fluting [motors]*. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 8, no. 5, pp. 53-57, Sep/Oct 2002. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1028391&isnumber=22082>
- [14] BONNETT, A. H. *Cause and analysis of bearing failures in electrical motors*. Petroleum and Chemical Industry Conference, 1992, Record of Conference Papers., Industry Applications Society 39th Annual, San Antonio, TX, 1992, pp. 87-95. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=229322&isnumber=5919>

- [15] CHMELÍK, Karel a SOJKA, Jaroslav. *Prostředky pro zamezení znehodnocování ložisek elektrickým proudem*. Časopis elektro 7/2003. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25552
- [16] PAVEC, Martin. *Jednostranný magnetický tah a excentricita v elektrických strojích*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, 2014. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Šobra
- [17] NĚMEČEK, Pavel a TOMEH, Elias. *Vibrační diagnostika základních závad strojů* [skripta k předmětu]. Technická univerzita v Liberci, 2010. Pdf dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1851>
- [18] AZEEZ, N. I., ALEX, A. C. *Detection of rolling element bearing defects by vibration signature analysis: A review*. Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMMD), 2014 Annual International Conference on, Kottayam, 2014, pp. 1-5. Dostupé z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6908270&isnumber=6908154>
- [19] ADASH. *Diagnostika valivých ložisek*. Dokumentace Adash 2000. c2010 [cit. 29.05.2016]. Pdf dostupné z: http://adash.com/doc/ApplicationNotes/diag_val_lozisek_man_cz.pdf
- [20] Příspěvatelé Wikipedie. *Fourierova transformace* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. c2016, poslední změna 04.01.2016 [cit. 29.05.2016]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fourierova_transformace&oldid=13197394
- [21] SPM Instrument. *dBm/dBc* [online]. Produktová dokumentace. c2016 [cit. 30.05.2016]. dostupné z: <http://www.spminstrument.com/methods/spm/>
- [22] SKF group. *Termografie* [online]. Produktová dokumentace. c2016 [cit. 30.05.2016]. dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/thermal-cameras/thermography/index.html>
- [23] ZHOU, W., HABETLER, T. G., HARLEY, R. G. *Bearing Fault Detection Via Stator Current Noise Cancellation and Statistical Control*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, pp. 4260-4269, Dec. 2008. Dostupé z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4627423&isnumber=4681672>
- [24] HORT, Filip. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [25] SPM Instrument. *Bearing Checker* [Fotografie]. Dostupné z: <http://www.spminstrument.cz/produkty-sluzby/prenosne-pristroje-pro-diagnostiku-stroju/bearing-checker>
- [26] ADASH. *A4300 VA3 Pro* [Fotografie]. Dostupné z: http://www.adash.cz/portable/product_a4300.php
- [27] SKF group. *Machine Condition Adviser* [Fotografie]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/vibration-measurement-tools/machine-condition-advisor/index.html>

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Součásti kluzného ložiska.....	10
Obr. 1.2: Hydrodynamické ložisko při rozběhu.....	12
Obr. 1.3: Hydrostatické ložisko za provozu.....	12
Obr. 1.4: Popis valivého ložiska.....	13
Obr. 1.5: Ukázka některých valivých ložisek a zatížení na ně působící.....	14
Obr. 1.6: Lineární aerostatické ložisko.....	15
Obr. 1.7: Aerodynamické ložisko.....	15
Obr. 1.8: Magnetické ložisko.....	16
Obr. 2.1: Silně poškozený kroužek valivého ložiska.....	17
Obr. 2.2: Schéma mechanismu adhezivního opotřebení.....	18
Obr. 2.3: schéma mechanismu abrazivního opotřebení.....	18
Obr. 2.4: Výrazné rýhy v pánvy kluzného ložiska způsobené adhezivním a abrazivním opotřebením.....	19
Obr. 2.5: Schéma mechanismu únavového opotřebení.....	19
Obr. 2.6: Schéma mechanismu vibračního opotřebení.....	20
Obr. 2.7: Kroužek valivého ložiska poškozený vibracemi.....	20
Obr. 2.8: Naznačení hřídelových napětí.....	22
Obr. 2.9: Typický vzor vznikající na kroužku valivého ložiska při poškození el. proudem (tzv. fluting).....	22
Obr. 2.10: Magnetický tah F_m působící na hřídel.....	24
Obr. 3.1: Vývoj činitele výkmitu za životnost ložiska.....	27
Obr. 3.2: Porovnání spektra vibrací bezvadného ložiska s poškozeným.....	29
Obr. 3.3: obálka signálu.....	29
Obr. 3.4: Spektrum obálky signálu.....	30
Obr. 3.5: Princip měření metodou SPM.....	30
Obr. 3.6: Zobrazení hodnot dBm a dBc a jejich porovnání s dB_N	31
Obr. 3.7: Přenosný přístroj „bearing checker“ společnosti SPM.....	31
Obr. 3.8: Obraz displeje termovizní kamery.....	32
Obr. 3.9: Přístroj pro vibrační diagnostiku ADASH A4300 VA3 Pro.....	34
Obr. 3.10: přístroj „bearing checker“ od společnosti SPM Instrument.....	34
Obr. 3.11: přístroj pro vibrační diagnostiku CMAS 100-SL od společnosti SKF.....	34

Seznam rovnic

1: Fourierova transformace.....	28
2: Inverzní Fourierova transformace.....	28
3: Diskrétní Fourierova transformace.....	28
4: Inverzní diskrétní Fourierova transformace.....	28
5: Výpočet normované veličiny dB_N	31
6: Výpočet počáteční hodnoty dB_i	31