



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MULTI-BODY MODEL VALIVÉHO LOŽISKA VHODNÝ PRE SIMULOVANIE PORUCHOVÝCH STAVOV

MULTI-BODY MODEL OF ROLLING-ELEMENT BEARING SUITABLE FOR THE FAULT SIMULATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. František Baláž

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Rekem

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. František Baláž**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Rekem**
Akademický rok: 2023/24

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:

Multi–body model valivého ložiska vhodný pre simulovanie poruchových stavov

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pri vývoji algoritmov umelej inteligencie, ktoré sú schopné rozpoznať poruchové stavy strojov je nutné mať k dispozícii veľké množstvo tréningových dát. Namiesto experimentálne získaných dát je možné využiť syntetické dáta vygenerované pomocou dostatočne komplexného matematického modelu, ktorý je jednoducho parametrizovateľný. Súčasný MBS softvéry umožňujú zostavenie takého modelu.

Ciele diplomové práce:

Rešerš v oblasti poruchových stavov a matematických modelov valivých ložísk.

Vytvorenie parametrického multi–body modelu valivého ložiska.

Porovnanie vlastností vytvoreného modelu s modelom vytvoreným pomocou vstavného pluginu MBS softvéru.

Porovnanie vlastností poruchových stavov vytvoreného modelu s experimentálnymi dátami.

Seznam doporučené literatury:

Idriss El-Thalji, Erkki Jantunen, A summary of fault modelling and predictive health monitoring of rolling element bearings, Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 60–61, 2015, Pages 252-272, ISSN 0888-3270.

C. Mishra, A.K. Samantaray, G. Chakraborty, Ball bearing defect models: A study of simulated and experimental fault signatures, Journal of Sound and Vibration, Volume 400, 2017, Pages 86-112, ISSN 0022-460X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa sústreďuje na analýzu a diagnostiku valivých ložísk, s cieľom vyvinúť parametrický a multi-body model, ktoré umožnia efektívne skúmať rôzne typy porúch. Pomocou týchto modelov je možné simulovať rôzne geometrické nedokonalosti a ich vplyv na dynamické vlastnosti ložísk. Na výpočet kontaktných síl a deformácií využíva model Hertzovu teóriu elastického kontaktu. Parametrický model je vytvorený pomocou softvéru Inventor a multi-body model pomocou MSC ADAMS. Práca si kladie za cieľ vytvoriť model produkujúci syntetické dáta porovnateľné s experimentálnymi dátami, aby sa zistilo, či ich možno efektívne nahradiť súčasnými softvérmi. Výsledky ukazujú, že presné modelovanie a simulácie môžu výrazne prispieť k prediktívnej údržbe a predĺženiu životnosti valivých ložísk.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

valivé ložiská, parametrický model, dynamický model, multi-body model, vibrácie, porucha

ABSTRACT

This thesis focuses on the analysis and diagnostics of rolling bearings, aiming to develop parametric and multi-body models that allow for effective examination of various types of defects. These models can simulate different geometric imperfections and their impact on the dynamic properties of bearings. The model uses Hertz's theory of elastic contact to calculate contact forces and deformations. The parametric model is created using Inventor software, and the multi-body model is developed using MSC ADAMS. The goal of this work is to create models that produce synthetic data comparable to experimental data, to determine if they can effectively replace current software. The results show that precise modeling and simulations can significantly contribute to predictive maintenance and extend the lifespan of rolling bearings.

KEYWORDS

rolling bearings, parametric model, dynamic model, multi-body model, vibrations, failure

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BALÁŽ, František. *Multi-body model valivého ložiska vhodný pre simulovanie poruchových stavov*. Online, diplomová práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedúci práce Jakub Rekem. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154058>.



ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Jakuba Rekema a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne, dňa 24. mája 2024

.....

František Baláž

POĎAKOVANIE

Týmto by som rád vyjadril svoju úprimnú vďaku všetkým, ktorí ma podporovali a usmerňovali počas celého procesu tvorby tejto diplomovej práce. Na prvom mieste chcem poďakovať svojmu vedúcemu práce, za jeho neoceniteľné rady, odborné vedenie a neustálu podporu. Chcem vyjadriť svoju vďačnosť aj kolegom a priateľom, ktorí mi počas štúdia poskytli morálnu podporu a pomoc pri zdieľaní nápadov a skúseností. Ich podpora a povzbudenie boli pre mňa veľmi dôležité. Nakoniec, veľké ďakujem patrí mojej rodine za ich nekonečnú lásku, podporu a trpezlivosť počas celého obdobia môjho štúdia. Bez ich porozumenia a povzbudenia by som tento úspech nedosiahol. Všetkým spomínaným a mnohým ďalším, ktorí prispeli k tejto práci, patrí moje hlboké poďakovanie.

Obsah

Úvod.....	11
1 Valivé ložisko.....	12
1.1 Zaťaženie vo valivom ložisku	12
1.2 Poruchové stavy valivých ložísk	13
1.2.1 Plošné poruchové stavy	13
1.2.2 Lokálne poruchové stavy.....	13
1.3 Straty.....	18
1.3.1 Valivé trenie	18
1.3.2 Kontaktné trenie	19
1.3.3 Viskózne straty	19
2 Diagnostika valivých ložísk.....	20
2.1 Subjektívna diagnostika.....	20
2.2 Akustická diagnostika	20
2.3 Termodiagnostika	20
2.4 Vibračná diagnostika	21
2.4.1 Spektrálna analýza.....	21
2.4.2 Obáľková analýza	22
3 Matematický model guľôčkového ložiska	24
3.1 Kontaktné sily a Hertzova teória kontaktu	24
3.2 Kinematika ložiska	25
3.3 Dynamický model ložiska	26
3.3.1 Základné vplyvy	26
3.3.2 Vývoj a použitie dynamických modelov	27
3.4 Zjednodušujúce predpoklady.....	28
3.5 Vedecké práce analyzujúce poruchy pomocou msc adams.....	28
3.5.1 Modely defektov guľôčkových ložísk: Štúdia simulovaných a experimentálnych znakov porúch.....	28
3.5.2 Detekcia lokalizovaného defektu na vnútornej dráhe guľôčkového ložiska na základe msc-adams	29
4 Vstupné dáta a ciele práce	30
4.1 Testovacia jednotka	30
4.2 Typy porúch a rozdelenie dát	30
4.3 Spracovanie dát.....	31
4.3.1 Výsledky práce	32
4.4 Ciele práce	32
5 Parametrický model	33
5.1 Parametrizácia	33
5.1.1 Vytvorenie užívateľských parametrov	34
5.1.2 Pravidlá.....	35
5.1.3 Formulár	39

6	Multi-body model.....	41
6.1	Zloženie modelu.....	41
6.1.1	Komponenty a väzby	42
6.1.2	Uloženie	43
6.2	Kontakty ložísk	45
6.3	Rotácia	49
6.4	Nastavenie solver-u.....	51
7	Vyhodnotenie výsledkov	52
7.1	Výsledky vytvoreného modelu	52
7.2	Úprava porúch.....	53
7.3	Diskusia.....	56
	Záver	57
	Použití informační zdroje	58
	Zoznam použitých symbolov a skratiek.....	62

ÚVOD

V posledných desaťročiach boli dosiahnuté významné pokroky v oblasti monitorovania a diagnostiky strojových zariadení, predovšetkým vďaka rozvoju metód založených na analýze vibrácií. Medzi kľúčové komponenty, ktoré majú významný vplyv na spoľahlivosť a efektivitu rotujúcich strojov, patrí bezpochyby valivé ložisko. Valivé ložiská predstavujú dôležitú súčasť rôznych mechanických systémov, zabezpečujúc plynulý a efektívny prenos síl a momentov. Ich správne fungovanie je kľúčové pre spoľahlivosť a životnosť strojov, preto je nevyhnutné porozumieť ich správaniu, diagnostikovať možné poruchy a vytvárať presné matematické modely pre simuláciu ich prevádzky.

Existujú rozsiahle výskumy zamerané na diagnostiku porúch valivých ložísk pomocou vibračnej a akustickej analýzy. Štúdie spomenuté v kapitole 3 preukázali, že tieto metódy sú efektívne pri identifikácii a charakterizácii porúch. Literatúra tiež ukazuje, že moderné softvérové nástroje umožňujú tvorbu detailných matematických modelov, ktoré môžu simulovať správanie ložísk pri rôznych podmienkach.

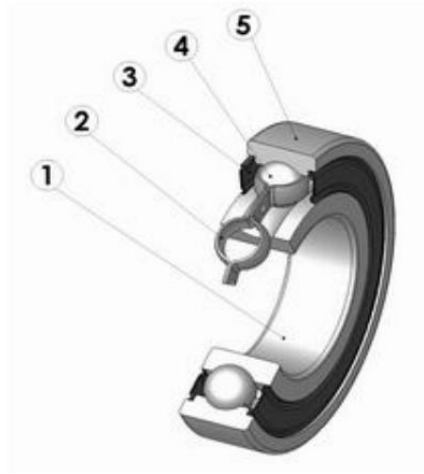
Zdrojom experimentálnych dát je v tejto práci dataset z Case Western Reserve University (CWRU), ktorý obsahuje rozsiahle merania vibrácií pre rôzne typy porúch ložísk. Tento dataset je široko používaný v akademickej a priemyselnej sfére pre testovanie a validáciu diagnostických algoritmov. Dáta z CWRU poskytujú detailné informácie o správaní ložísk pri rôznych podmienkach, čo umožňuje presnú analýzu a overenie simulácií vytvorených modelov. Analýza týchto dát prispieva k lepšiemu pochopeniu diagnostických metód a ich aplikácii na reálne prevádzkové podmienky.

Táto diplomová práca sa zaoberá analýzou porúch valivých ložísk, využitím diagnostických metód a tvorbou parametrických modelov. Cieľom tejto práce je vytvoriť parametrický a multi-body model, ktorý umožní detailné skúmanie rôznych typov porúch a ich vplyvu na dynamické vlastnosti ložísk. Podrobná analýza vplyvov porúch na vibrácie ložiska je potrebná pri identifikácii možností, ako syntetické modely môžu efektívne napodobňovať podmienky v reálnom svete. Porovnanie syntetických a experimentálnych dát pomôže nielen overiť presnosť modelov, ale tiež poskytne lepšie porozumenie mechanizmov zlyhania valivých ložísk a prispieva k vývoju spoľahlivejších diagnostických nástrojov a stratégií údržby.

Implementácia modelu je realizovaná pomocou softvéru Inventor od spoločnosti AUTODESK a simulačných nástrojov MSC ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), ktoré umožňujú simulovať rôzne geometrické nedokonalosti a ich následky.

1 VALIVÉ LOŽISKO

Valivé ložisko je mechanická súčiastka, ktorá slúži na prenos síl medzi pohyblivými a nepohyblivými časťami strojov a umožňuje výrazne eliminovať klzné trenie. Takmer všetky valivé ložiská pozostávajú z piatich základných častí: vnútorný krúžok, vonkajší krúžok, valivé prvky (najčastejšie guľička alebo valček), klietka a tesnenie (obr. 1-1) [1][2]. Kontaktná plocha je zvyčajne malá, pričom ložiská často prenášajú veľkú záťaž pri vysokých otáčkach. Z tohto dôvodu sú používané materiály, ktoré majú vysokú odolnosť voči únave, opotrebeniu, ale taktiež vysokú tvrdosť a tuhosť [3].



Obr. 1-1 1-vnútorný krúžok, 2-klietka, 3-tesnenie, 4- valivý prvok (guľička), 5-vonkajší krúžok

Valivé ložiská sa rozdeľujú [1][4]:

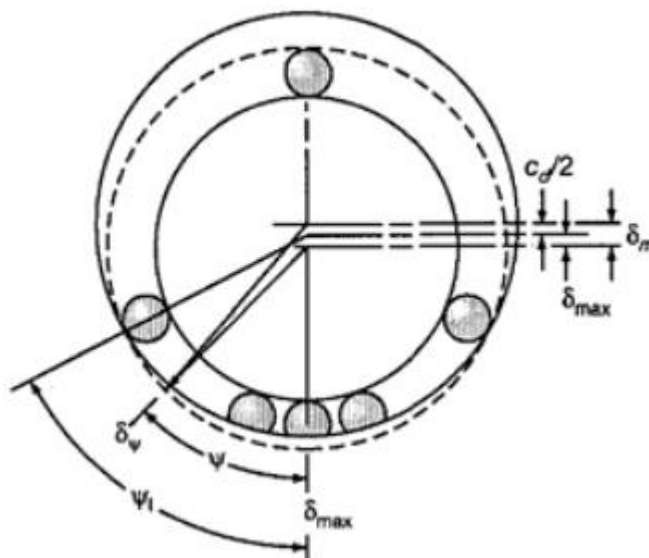
- podľa typu zaťaženia na: axiálne, radiálne a kombinované,
- podľa počtu radov valivých elementov na: jednoradové, dvojradové a viaceradové,
- podľa tvaru valivých telies na: guľôčkové, valčekové, ihlové, súdkové a kuželíkové.

Dĺžka prevádzkyschopnosti ložiska je rozdeľovaná na trvanlivosť a životnosť. Trvanlivosť ložiska je definovaná ako počet hodín pri stálej rýchlosti otáčania, alebo počet otáčok ložiskového krúžku voči druhému krúžku, ktoré sú vykonané pred prvým príznakom únavy na niektorej z častí ložiska. Pri trvanlivosti sa počíta s bezchybným chodom ložiska. V reálnych podmienkach často nastávajú rôzne chyby pri montáži, údržbe, alebo dochádza k prehriatiu či preťaženiu stroja. Spomenuté chyby majú za následok zvyšovanie opotrebovania, ktoré vyústi až do porúch ložísk. Poruchy majú za následok skrátenie životnosti [5][6].

1.1 ZAŤAŽENIE VO VALIVOM LOŽISKU

Zaťaženie, ktoré nesú valivé ložiská, sa prenáša cez valivé elementy z jedného krúžku na druhý. Miera zaťaženia, ktoré nesie jednotlivá guľôčka, závisí od vnútornej geometrie ložiska a druhu aplikovaného zaťaženia. Okrem statického zaťaženia sú valivé elementy vystavené aj dynamickému zaťaženiu spôsobenému rýchlostnými efektmi, ktoré sú taktiež ovplyvnené geometriou ložiska [7].

Pri statickom zaťažení v radiálnom smere nastáva elastická deformácia a posuv o radiálnu vôľu. Zaťažením je eliminovaná vôľa a zároveň vznikne vzájomný kontakt spôsobujúci deformáciu medzi dráhou a valivým elementom. Najväčšia elastická deformácia vznikne v osi pôsobiacej sily. Na obrázku 1-2 označená ako δ_{max} [7].



Obr. 1-2 Staticky radiálne zaťažené guľôčkové ložisko [7].

Dynamické zaťaženie ložiska vyjadruje maximálne zaťaženie, ktoré ložisko môže znášať pri určitej rýchlosti otáčania bez toho, aby došlo k jeho poškodeniu alebo výraznému skráteniu jeho životnosti. Dynamické zaťaženie ložiska je obvykle udávané ako základná dynamická nosnosť ložiska. Táto hodnota je výsledkom testovania a výpočtov výrobcov ložísk a zohľadňuje rôzne faktory, ako sú materiály ložiska, jeho geometria, mazanie a prevádzkové podmienky [8].

1.2 PORUCHOVÉ STAVY VALIVÝCH LOŽÍSK

Poruchy v ložiskách pôsobia ako zdroje vibrácií a hluku. Ložiská so záťažou generujú vibrácie a hluk aj pri dokonalej geometrii. Je to spôsobené konečným počtom valivých elementov na prenos zaťaženia, čo vedie k periodickému meneniu celkovej tuhosti zostavy ložiska. Prítomnosť porúch však vibrácie zvyšuje. Poruchy sú ďalej rozdeľované na plošné a lokálne. [9][10]

1.2.1 PLOŠNÉ PORUCHOVÉ STAVY

Táto kategória zahŕňa najmä chyby spôsobené pri výrobe, montáži alebo abrazívnym opotrebovaním. Ako plošné poruchy sú označované napríklad drsnosť povrchu, vlnitosť alebo nesprávne rozmery jednotlivých prvkov. Pri plošných chybách sa kontaktná sila mení, čo má za dôsledok zvýšenie vibrácií. Meranie vibrácií spôsobených plošnými poruchami je vhodné pre kontrolu kvality ložísk [10][11].

1.2.2 LOKÁLNE PORUCHOVÉ STAVY

Lokálne poruchové stavy valivých ložísk sa klasifikujú podľa ich umiestnenia ako poruchy vonkajšieho krúžku, vnútorného krúžku, valivého elementu, klietky a tesnenia. Všeobecným dôvodom týchto porúch je zvýšené napätie v mieste valivého kontaktu. Tieto zmeny v

kontaktné oblasti vytvárajú body koncentrácie napätia a poruchy filmu maziva, tie vedú k vývoju opotrebovania [12][1].

1.1.2.1. OPOTREBOVANIE

Mechanické povrchové poškodenie, pri ktorom ložiská strácajú významnú časť materiálu. Poškodenie vzniká v dôsledku relatívneho pohybu medzi funkčným povrchom a kontaktným médium. Toto médium môže byť ďalší povrch, kvapalina alebo odštiepené častice materiálu. Opotrebovanie sa ďalej rozdeľuje na [13]:

- abrazívne,
- adhézne,
- erózne,
- oxidačné.

ABRAZÍVNE OPOTREBOVANIE

Definované ako strata materiálu alebo zmena povrchu. Spôsobené môže byť kontaktom funkčných povrchov alebo povrchu a média. Prejavuje sa odstraňovaním alebo premiestňovaním materiálu z funkčných plôch v dôsledku ryhovania a rezania. Tvrdý, hrubý povrch klže po mäkšej ploche, pričom tvrdší materiál je jedna z funkčných plôch, alebo častice nachádzajúce sa medzi trecími plochami. Tieto častice môžu byť cudzie, ale taktiež môžu vzniknúť vplyvom adhézneho opotrebovania [13].

Spôsob, akým výbežok klže po povrchu, určuje povahu a intenzitu abrazívneho opotrebovania. Existujú dve základné módy abrazívneho opotrebovania[13]:

- dvojtelesové – keď abrazívne častice odoberajú materiál z druhého povrchu,
- trojtelesové – abrazívne častice sa nachádzajú medzi dvomi telesami (nečistoty v ložisku).

ADHÉZNE OPOTREBOVANIE

Adhézne opotrebovanie prevažuje pri trení dvoch povrchov s nízkou hodnotou drsnosti povrchu. Pri kontakte povrchov pritláčaných normálovou silou, bez vplyvu cudzích častíc dochádza k vytvoreniu mikrozvarov, čo má za následok prenos materiálu medzi jednotlivými časťami. Týmto spôsobom taktiež dochádza k oddeľovaniu materiálu. Oddelené častice môžu prilnúť späť k pôvodnému povrchu, zostávajú prilnuté k povrchu druhého telesa, alebo vystupujú ako voľné častice medzi funkčnými povrchmi. Veľký vplyv na adhézne opotrebovanie má voľba materiálu[13].

EROZÍVNE OPOTREBOVANIE

Erozívne opotrebovanie je poškodzovanie povrchu vystaveného pôsobeniu kvapalinami a plynmi priamo, alebo nepriamo (cudzíe častice sú nesené v kvapalinách a plynch). [13].

Miera opotrebovania závisí od faktorov ako charakteristika a tvar častíc, rýchlosť nárazu, uhol dopadu, tvrdosť a vlastnosti povrchu, ktorý je vystavený erózii. Erózne opotrebovanie môže byť klasifikované do 3 kategórií[13]:

- erózia pevných častíc – erózia v dôsledku neustáleho dopadania pevných častíc prítomných v kvapaline,

- erózia kvapaliny – erózia v dôsledku neustálych úderov kvapaliny na povrch materiálu,
- kavitácia – para alebo plyn spôsobí bubliny ktorých implózia narúša materiál.

OXIDAČNÉ OPOTREBOVANIE

Proces nazývaný taktiež ako korózia je degradácia materiálu v dôsledku kombinovaného účinku korózie a opotrebovania. Ide o proces, pri ktorom dochádza k opotrebovaniu v korozívnom prostredí. V absencii posuvu by produkty korózie (napríklad oxidy) vytvárali film typicky menší ako mikrometer na povrchoch, ktorý spomaľuje až eliminuje koróziu avšak vplyvom posuvu sa tento film opotrebuje a vzniká korózia. Oxidačné opotrebovanie je jednou z najbežnejších foriem korózneho opotrebovania, pretože na kyslík bohaté prostredie je typickým prostredím, v ktorom tento proces opotrebovania nastáva. Korózne opotrebovanie vyžaduje kombináciu korózie a trenia [13].

1.1.2.2. ÚNAVOVÉ PORUCHOVÉ STAVY V LOŽISKÁCH

Je to jeden z hlavných mechanizmov, ktorý ovplyvňuje funkciu valivých ložísk. Vplyvom cyklického namáhania valivých telies dochádza k poruchám materiálu, čo skracuje jeho životnosť. Základnými druhmi únavových poškodení sú:

- pitting,
- oter,
- brinelling,
- korózia.

PITTING

Pitting je takzvaná „dierkovaná korózia“. Vzniká iniciáciou únavovej trhliny s následným vydrobením materiálu z povrchu styku. Za následok to má malé povrchové jamky, ktoré napomáhajú k degradácii súčiastky. Časom sa tieto jamky spájajú do väčších celkov (Obr. 1-3). Taktiež ovplyvňuje presnosť a drsnosť povrchu, čím sa mení frekvencia a hluk. Toto poškodenie je spôsobené kontaktnou únavou materiálu vzniknutou miestnym zaťažením na jednotlivé prvky ložiska. [2][14].



Obr. 1-3 Pitting na vnútornom krúžku ložiska[14].

OTER

Oter je definovaný ako prenos materiálu povrchu z jednej súčasti na druhú vo forme makroskopických škvŕn. Mechanizmus oteru súvisí s vyššou trecou silou a nárastom teploty v mikrooblastiach vrcholov drsnosti. Vo vrcholoch sú vytvorené mikrozvary, ktoré sa odtrhávajú a vzniká presun materiálu. Vo valivom ložisku je možnou príčinou vzniku oteru spojovať s

nadmerným uhlovým zrýchlením, trením klietky, tepelnou nerovnováhou a poruchami geometrie [15].



Obr. 1-4 Oter na kolese z lietadla[16].

Na obrázku 1-4 sa nachádza ložisko z kola lietadla. Je tam viditeľný oter ktorý bol zapríčinený zvýšenou teplotou a tvorbou mikrozvarov, ktoré následne presúvali materiál a vytvorili poškodenie [16].

Brinelling je porucha, pri ktorej sa vytvárajú odtlačky na ložisku. Rozdeľujú sa 2 základné typy (Obr. 1-5)[17]:

- skutočný brinelling – zaťaženie na ložisko je väčšie ako elastický limit materiálu,
- falošný brinelling – vyzerá podobne ako skutočný brinelling, ale jamky sú vytvorené prostredníctvom vibrácií a nie nutne nadmerným zaťažením.

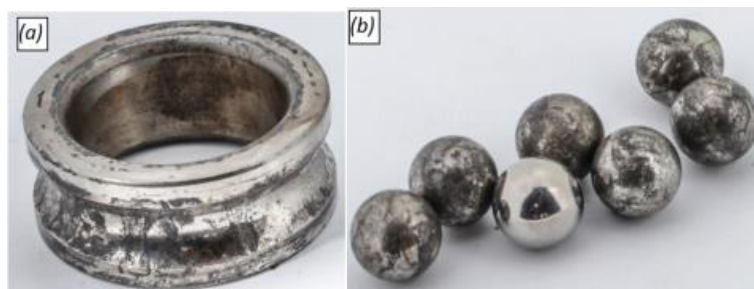


Obr. 1-5 Skutočný (vľavo) a falošný (vpravo) brinelling [17].

KORÓZIA

Korózia je definovaná ako chemická alebo elektrochemická reakcia medzi povrchovým materiálom ložísk a prostredím. Môže sa realizovať pri styku plynov, kvapalín alebo iných chemických látok s kovom [2]. Korózií je viacero druhov, napríklad:

1. vibračná – vzniká v prípade, ak je medzi dvomi telesami medzera, na obrázku 1-6 sú to vnútorný krúžok a guľičky. Medzera spôsobí relatívny pohyb medzi jednotlivými časťami, na ktorých dochádza k odtrhávaniu malých častíc v dôsledku vibrácií a nedostatku lubrikačnej vrstvy. Takto vytvorené diery sa časom spájajú. Povrchy postihnuté vibračnou koróziou sú pokryté červenými oxidovými povlakmi, čiernymi povlakmi od oleja, alebo v prítomnosti vody, pokryté hrdzou.



Obr. 1-6 Vibračná korózia na vnútornom krúžku (a) a guľičkách (b)[18].

2. Kavitačná – forma korózie, ktorá vzniká v dôsledku tvorby malých bublín v kvapaline nachádzajúcich sa blízko povrchu materiálu. Výskyt je charakteristický vysokými rýchlosťami a zmenou tlaku, ktorá spôsobuje tvorbu a následnú implóziu bublín. Implózia odštípi mikrofragmenty z povrchu ložiska a vzniká poškodenie (Obr. 1-7) [2].



Obr. 1-7 Kavitácia v okolí olejových drážok [19].

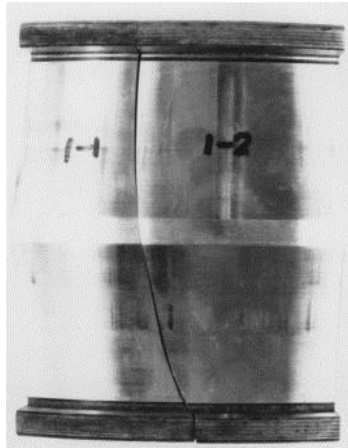
3. Galvanická – bežná príčina korózie motorových ložísk. Vzniká prechodom elektrického prúdu cez ložisko. V kontaktných miestach je ložisko natavované a vzniká poškodenie (Obr 1-8) [20].



Obr. 1-8 Galvanická korózia na dráhe vonkajšieho krúžku [20].

ĎALŠIE

Krehký lom sa v ložiskách zvyčajne nachádza vo vnútornej drážke. Keďže je pracovné napätie krehkého lomu nízke, príčiny zlyhania sú väčšinou spojené s oslabením materiálu. Podmienky, ktoré dopomáhajú k vzniku krehkého lomu sú napríklad nesprávne tepelné spracovanie a kovanie, oslabená pevnosť hranice zrn alebo nesprávne obrobenie súčiastky [2].



Obr. 1-9 Krehký lom ložiska [21].

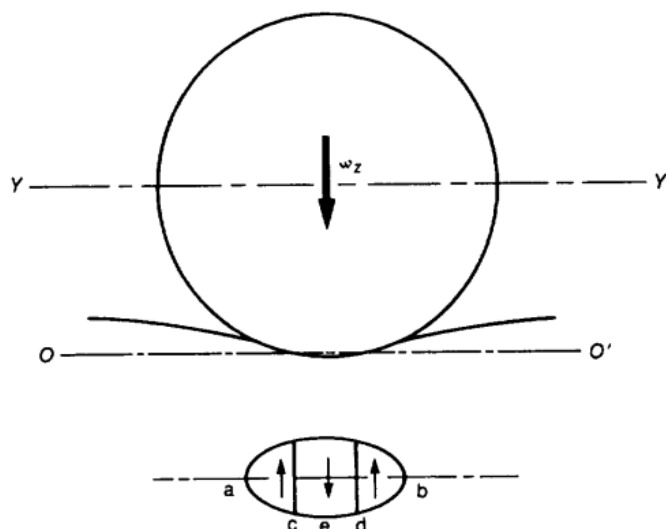
Na obrázku 1-9 je znázornený krehký lom ložiska, ktoré na základe chybnéj mikroštruktúry materiálu nevydržalo sily vyvinutú pri montáži [21].

1.3 STRATY

Pohyby valivého ložiska sú komplexnejšie ako čisté valenie, z toho dôvodu dochádza v týchto komponentoch k vzniku trecích síl. Trenie spôsobuje odpor proti pohybu, čoho následkom je zvýšená teplota a energetické straty. Hlavnými typmi trenia sú kontaktné a valivé trenie. Na veľkosť trenia vplyva taktiež mazivo alebo prípadné použitie tesnenia [22].

1.3.1 VALIVÉ TRENIE

Valivé trenie predstavuje v ložisku energiu, potrebnú na prekonanie medzipovrchového sklzu, ktorý nastáva z dôvodu zakrivenia kontaktnej plochy. Na obrázku 1-10 je znázornená eliptická plocha dotyku guľôčkového ložiska. Dotyk je od bodu a do bodu b. Šmyk nastáva z dôvodu rozdielnej vzdialenosti jednotlivých bodov od osi Y, čo zapríčiňuje rozdielnu rýchlosť, tá je rovná uhlovej rýchlosti krát vzdialenosť od osi. Smer sklzu v jednotlivých častiach určujú šípky na obrázku. Body c a d sú v tomto prípade jediné miesta, kde nedochádza ku klzaniu. [7].



Obr. 1-10 Eliptická kontakt guľôčky s dráhou[7].

1.3.2 KONTAKTNÉ TRENIE

Tento druh trenia zahŕňa odpor z jednotlivých kontaktov rôznych plôch. Pri guľôčkovom ložisku je to kontakt s kľetkou a ak je použité, tak aj kontakt s tesnením.

KONTAKT KLIETKY

Existujú 3 základné typy v závislosti na ktorom telese je kľetka vedená. Sú to kontakty medzi:

- kľetkou a vnútorným krúžkom,
- kľetkou a vonkajším krúžkom,
- kľetkou a valivým elementom.

Najjednoduchšie na výrobu je vedenie na valivom elemente, avšak neodporúča sa používať v kritických aplikáciách. Výber medzi vedením na vnútornom alebo vonkajšom krúžku závisí na použití a konštruktérovi. Rozdielom je, že pri vedení na vnútornom krúžku je kľetka zrýchľovaná krúžkom a valivým elementom, zatiaľ čo pri vonkajšom krúžku je spomaľovaná [22].

KONTAKT TESNENIA

Tesnenie väčšinou pozostáva z elastoméru na oceľovom alebo plastovom nosiči. Tesnenie je nasadené tak, aby sa dotýkalo vnútorného aj vonkajšieho krúžku, pričom sa dotýka steny krúžku, prípadne je vytvorené špeciálne vybratie pre tesnenie. V oboch prípadoch je však toto trenie podstatne väčšie ako súčet všetkých ostatných zdrojov trenia v ložisku [22].

1.3.3 VISKÓZNE STRATY

Sú spôsobené mazivom, ktoré sa pri rotácii odliepa z guľičky (ostáva iba tenký film), a to spôsobuje ťah, ktorý pôsobí proti smeru rotácie. Veľkosť tejto sily závisí od množstva maziva.

2 DIAGNOSTIKA VALIVÝCH LOŽÍSK

Technická diagnostika sa vykonáva metódami, ktoré nevyžadujú demontáž a sú nedeštruktívne. Súčasťou technickej diagnostiky je sledovanie činnosti systému alebo jeho časti kvôli overeniu správnej funkcie popri prípade odhalenia poruchových častí. Meranie sa v závislosti na potrebe vykonáva s rôznym počtom premenných. Následne sú namerané hodnoty porovnávané a analyzované so stanovenými hodnotami [23]. Ložiská s chybami obvykle prejavujú zreteľné znaky poruchy, ktoré sú ľahko identifikovateľné. Medzi najčastejšie príznaky chýb patria nadmerné prehrievanie, vydávanie zvukov alebo vibrácie.

Pri diagnostike ložísk sa používajú hlavne typy ako:

- subjektívna diagnostika,
- akustická diagnostika,
- vibračná diagnostika,
- termodiagnostika.

2.1 SUBJEKTÍVNA DIAGNOSTIKA

Z praktického hľadiska nie všetky diagnostiky používajú komplikované systémy. Základnými snímačmi pri subjektívnej diagnostike sú ľudské zmysly ako hmat (teplota), sluch (vibrácie a hluk) a zrak (vizuálne chyby)[12].

Aby sa zlepšili a spresnili merania používajú sa pri subjektívnej diagnostike prenosné zariadenia. Pri akustických meraniach je používaný technický stetoskop, pri tepelných je to dotykový teplomer a vizuálne metódy sú podporované zväčšovacími sklami alebo endoskopmi [12].

2.2 AKUSTICKÁ DIAGNOSTIKA

Sleduje akustické emisie vychádzajúce z kontrolovaného zariadenia. Zvuk pri poškodenom krúžku je charakteristicky zmenou pri rôznych otáčkach. V prípade, že je poškodený valivý element, je zvuk nepravidelný[12].

Chyby vytvárajú akustické emisie v podobe napät'ových vln, ktoré sa šíria materiálom. Na presné meranie týchto vln sa používajú primárne keramické piezoelektrické snímače prevádzajúce napät'ové vlny na signál. Frekvenčné pásmo týchto snímačov je od 20kHz do 4000kHz a má schopnosť zamerať chybu materiálu v rádoch až 10^{-14} m . Táto metóda dokáže odhaliť poškodenie v prvotných fázach, avšak problémom je spracovanie kvôli vyššej úrovni šumu [24].

2.3 TERMODIAGNOSTIKA

Používaná je na sledovanie a vyhodnocovanie teploty povrchu. Meranie je vykonávané bezdotykovo pomocou termokamery. Pri ložiskách termodiagnostika slúži iba ako preventívna údržba, kedy je kontrolovaná teplota náhodných ložísk. Pokiaľ je zistené zvýšenie teploty, je potrebné ložisko podrobiť ďalšej diagnostike [25].

2.4 VIBRAČNÁ DIAGNOSTIKA

Pri práci každého stroja dochádza k vibráciám, ktoré sú väčšinou nežiaducim sprievodným javom. Výrazne zvyšujú zaťaženie komponentov, sú príčinou otrasov, ktoré zaznamenávame v okolí, a spôsobujú hluk. Meranie a analýza vibrácií stroja je diagnostická metóda, ktorá má v oblasti bezdemontážnej diagnostiky veľký význam. Umožňuje určenie okamžitého stavu stroja, lokalizáciu porúch a zistenie ich príčin. Pravidelnému sledovaniu stroja vždy predchádza jeho teoretická analýza, ktorá určí sledované parametre a merané veličiny. Dôležité je stanovenie intervalu, v ktorom sa meranie bude opakovať. Periodické sledovanie parametrov vibrácií musí umožniť vytvorenie prípadného trendu zmien meraných veličín, aby sa zmeny vznikajúce v dôsledku opotrebovania alebo poruchy včas identifikovali a poruche bolo možné predísť včasnou údržbou. Vibračná diagnostika tiež predchádza zbytočným údržbovým zásahom a tým zvyšuje životnosť sledovaného zariadenia [26].

Každé ložisko generuje signál nízkej frekvencie. Nízka frekvencia signálu závisí na počte a veľkosti valivých elementov, uhle kontaktu ložiska a priemere dráhy valivého elementu. Keď nastane porucha, tak pri každom prejazde po nej je generovaný signál vysokej frekvencie spôsobujúci vrcholovú amplitúdu signálu. Vysoko a veľmi vysokofrekvenčné signály sú spôsobené poškodením. Tieto frekvencie sú tvorené vibrovaním a teda zrýchlením, ktoré je merané pomocou akcelerometra.

Vzhľadom k intenzite je signál rozdeľovaný na [12]:

- nízkofrekvenčný (0-2 kHz),
- vysokofrekvenčný (2-50 kHz),
- veľmi vysokofrekvenčný (viac ako 50 kHz).

Podľa intenzity signálu je taktiež možné rozdeľovať opotrebovanie ložísk do štyroch fáz [25]:

1. prvá fáza – defekty v mikrometroch, akustická emisia je vo frekvenciách MHz,
2. druhá fáza – nastáva opotrebovanie jednotlivých elementov. Signál je maskovaný za nízkofrekvenčnými zložkami. Diagnostika prebieha v ultrazvukovom pásme (20kHz-60kHz). Merania prebiehajú pomocou ultrazvukových akcelerometrov s vysokou hodnotou rezonančnej frekvencie,
3. tretia fáza – sú vytvárané mechanické rázy pri pohybe poškodeného prvku. Pri náraze dochádza k prenosu kinetickej energie a následne je rozkmitané teleso pri frekvenciách 5-20 kHz. Na meranie je používaný klasický akcelerometer,
4. štvrtá fáza – kritické poškodenie ložísk.

2.4.1 SPEKTRÁLNA ANALÝZA

Je to frekvenčná analýza, ktorej cieľom je rozloženie signálu vo frekvenčnej oblasti, teda vyjadriť analyzovaný signál pomocou ortogonálnych (navzájom kolmých) básových funkcií. Je tak dosiahnuté pomocou Fourierovej Transformácie (FT), v ktorej je básová funkcia $e^{-j2\pi ft}$ a jej tvar je [25]:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

kde $x(t)$ je spojitý signál, f je frekvencia a j je imaginárna jednotka.

FT je vhodná pre neperiodické spojité signály a obvykle býva komplexná (obsahuje reálnu a imaginárnu zložku) [25].

V prípade výskytu diskretných signálov sa používa diskrétna Fourierova transformácia (DFT). Je vhodná najmä pre stacionárne signály (menené v čase). DFT je vyjadrená ako:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{N-1} \left(x(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \right) \quad (2.2)$$

Kde $k = 0, 1, \dots, N-1$ a N je počet vzoriek [27].

2.4.2 OBÁLKOVÁ ANALÝZA

Často sa stáva že nespracovaný (raw) signál obsahuje iba málo diagnostických informácií o poruchách. Preto sa na túto problematiku používa obáľková metóda. Pri obáľkovej analýze je signál filtrovaný vo vysokofrekvenčnom pásme, v ktorom sú poruchové impulzy zosilnené rezonanciami [28]. Amplitúda je následne demodulovaná a je vytvorený obáľkový signál, ktorého spektrum obsahuje požadované informácie pre diagnostiku, hlavne periodické frekvencie ktorými sú [29]:

- BPFO (Ball Pass Frequency – Outer Race) – frekvencia vonkajšieho krúžku,

$$\text{BPFO} = \frac{nf_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\varphi \right) \quad (2.3)$$

- BRFI (Ball Pass Frequency – Inner Race) – frekvencia vnútorného krúžku,

$$\text{BRFI} = \frac{nf_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\varphi \right) \quad (2.4)$$

- BSP (Ball Spin Frequency) – frekvencia guľičky,

$$\text{BSP} = \frac{Df_r}{2d} \left(1 - \left[\frac{d}{D} \cos\varphi \right]^2 \right) \quad (2.5)$$

- FTF (Fundament Train Frequency) – frekvencia klietky.

$$\text{FTF} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\varphi \right) \quad (2.6)$$

n – počet valivých elementov

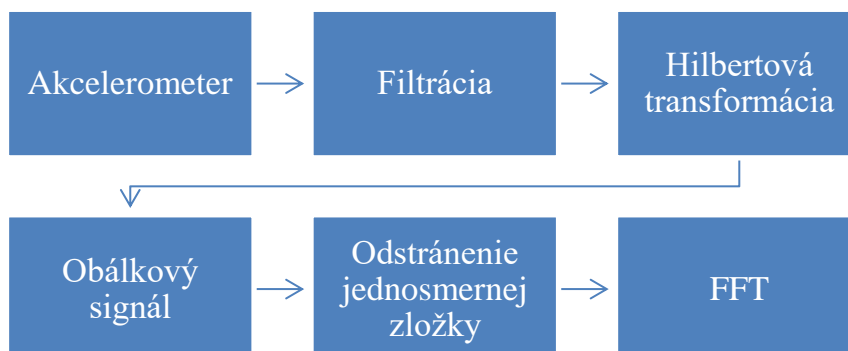
f_r – frekvencia relatívneho otáčania krúžkov voči sebe

d – priemer valivého elementu

D – priemer dráhy valivého elementu

φ – uhol dotyku

Kroky pri obáľkovej analýze majú logickú následnosť zobrazenú na obrázku 2-1.



Obr. 2-1 Postup pre zistenie poškodenia ložiska obáľkovou analýzou

1. Nameranie hodnôt pomocou akcelerometra.
2. Odstránenie šumov pomocou filtra.
3. Hilbertova transformácia - je matematická metóda, ktorá umožňuje prechod z reálneho signálu na jeho analytický tvar, ktorý obsahuje informácie o amplitúde a fáze signálu. Na začiatku sa vypočíta Rýchla Fourierova Transformácia (FFT) zo vstupného signálu. V takto upravenom signáli sa nahradia koeficienty, ktoré patria záporným frekvenciám nulami. Z koeficientov je vypočítaná FFT, ktorej výsledkom je analytický signál. Tento analytický tvar je potom použitý na výpočet obáľky signálu [30].
4. Obáľkový signál - absolútna hodnota analytického signálu.
5. Je odstránená jednosmerná zložka pomocou číslicového filtra.
6. Následne je použitá FFT, ktorej výsledkom je obáľkové spektrum.

3 MATEMATICKÝ MODEL GULŔŔKOVÉHO LOŽISKA

Matematický model je teoretický rámec, ktorý používa matematické rovnice a vzťahy na opísanie správania a vlastností gulŔŔkového ložiska pod rôznymi zaťaženiami a v rôznych pracovných podmienkach. Tento model umožňuje analyzovať a predpovedať výkon ložiska, vrátane zaťaženia, deformácie, distribúcie tlaku, životnosti, a mazacieho režimu. Modely sa typicky analyzujú pomocou počítačových simulačných programov, ktoré umožňujú detailnú analýzu rôznych faktorov.

3.1 KONTAKTNÉ SILY A HERTZOVA TEÓRIA KONTAKTU

V matematickom modeli sa predpokladá, že kontaktné sily medzi gulŔŔkami a drážkami ložiska sú distribuované podľa Hertzovej teórie elastického kontaktu. Táto teória poskytuje vzťahy pre výpočet kontaktných síl a deformácií na základe geometrie kontaktných plôch, materiálových vlastností a aplikovaného zaťaženia.

V kontexte gulŔŔkových ložísk umožňuje Hertzova teória určiť, ako sa gulŔŔky a drážky deformujú pod zaťažením, čo je kľúčové pre výpočet distribúcie zaťaženia v ložisku, kontaktných napätí a únavovej životnosti. Keď sa gulŔŔka a krúžok dostanú do kontaktu pod zaťažením, na ich styčnej ploche sa vytvára kontaktné napätie, ktoré má typicky eliptické rozloženie. Hertzove rovnice umožňujú vypočítať distribúciu tohto napätia a veľkosť deformácie v kontaktnej oblasti [31].

Predpoklady Hertzovej teórie [31]:

1. Materiály v kontakte sú homogénne, elastické a nie je prekročené maximálne šmykové napätie.
2. Kontaktná oblasť je malá v porovnaní s rozmermi telies.
3. Telesá sú v ustálenom stave.
4. Pohyb je obmedzený len na normálny (kolmý) smer k povrchu.

Rovnica pre výpočet deformácie pomocou Hertzovej teórie je nasledovná [31]:

$$\delta = \psi \left[\left(\frac{9}{2\varepsilon R'} \right) \left(\frac{W}{\pi k E'} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.7)$$

kde ψ a ε sú eliptické integrály,

$$\psi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \sin^2 \theta \right]^{-\frac{1}{2}} d\theta \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} d\theta \quad (2.9)$$

k je eliptický parameter,

$$k = 1,0339 \left(\frac{R_y}{R_x} \right)^{0,636} \quad (2.10)$$

R_y a R_x sú redukované polomery jednotlivých os v elipse,

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{ay}} + \frac{1}{R_{by}} \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{bx}} \quad (2.12)$$

R' je redukovaný polomer,

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \quad (2.13)$$

E' je redukovaný modul pružnosti materiálov,

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} \right] \quad (2.14)$$

a W je sila na najviac zaťaženom elemente.

$$W = \frac{5F_L}{n} \quad (2.15)$$

3.2 KINEMATIKA LOŽISKA

Kinematická analýza gul'ôčkových ložísk sa zakladá na rovniciach, ktoré prepájajú geometriu a interné pohyby v gul'ôčkových ložiskách. Tieto rovnice poskytujú ucelený rámec pre pochopenie, ako sa gul'ôčky a dráhy v ložiskách pohybujú vo vzájomnej interakcii.

V kinematike ložiska rozlišujeme štyri základné rýchlosti [32]:

rýchlosť vonkajšej dráhy v_o ,

rýchlosť vnútornej dráhy v_I ,

orbitálnu rýchlosť gul'ôčky v_R

a rýchlosť otáčania gul'ôčky okolo vlastnej osi ω_S .

Rýchlosti vonkajšej a vnútornej dráhy sú považované za nezávislé premenné, ktoré definujú režim otáčania ložiska [32].

Celková rýchlosť ložiska V sa definuje ako rozdiel medzi rýchlosťou vonkajšej a vnútornej dráhy. Priemerná rýchlosť A je aritmetickým priemerom rýchlosti vonkajšej a vnútornej dráhy.

Orbitálna rýchlosť guľôčky v_R sa v prípade dokonalého otáčania (bez prešmyku) rovná priemernej rýchlosti,

$$v_R = A = \frac{v_I + v_o}{2} \quad (2.16)$$

a rýchlosť jej otáčania ω_S sa rovná celkovej rýchlosti ložiska vydelené priemerom valivého elementu [33].

$$\omega_S = \frac{V}{d} \quad (2.17)$$

3.3 DYNAMICKÝ MODEL LOŽISKA

Dynamický model ložiska je matematický popis, ktorý sa používa na simuláciu a analýzu správania sa ložiskového systému v pohybe. V dynamickom modeli sa zohľadňujú faktory ako sú geometria ložiska, zaťaženie, rýchlosť, teplota, mazivo a ďalšie, ktoré môžu ovplyvniť jeho správanie. Výpočet prebieha pomocou diferenciálnych rovníc.

Flexibilné deformácie štruktúry ložiska, spôsobené fyzikálnymi silami pôsobiacimi na jeho komponenty počas zaťaženia, majú významný vplyv na jeho dynamické vlastnosti. Tieto deformácie môžu viesť k zmenám vo vnútornom napätí, kontaktnej geometrii, a tým ovplyvniť celkový výkon ložiska [34].

3.3.1 ZÁKLADNÉ VPLYVY

3.3.1.1 MAZANIE A TEPLOTA

Mazivo výrazne ovplyvňuje fungovanie ložísk. Mazanie znižuje trenie a opotrebovanie, zlepšuje čistenie a chladiaci účinok. V guľôčkových ložiskách s vysokými otáčkami a elastickými povrchmi sa používa elastohydrodynamické mazanie (EHL). EHL sa zaoberá kontaktom medzi elastickými povrchmi oddelenými tenkou vrstvou maziva pod vysokým tlakom [35].

Mazivo a jeho viskozita je do značnej miery ovplyvňované teplotou. Zvýšenou teplotou sa znižuje viskozita maziva, čo má za následok zhoršené mazanie. Zvýšená teplota ale taktiež ovplyvňuje geometriu ložiska prostredníctvom tepelnej rozťažnosti materiálov.

3.3.1.2 VPLYV GEOMETRIE

Geometrické nedokonalosti spôsobené výrobnými chybami komponentov ložiska, aj keď sú na úrovni nanometrov, môžu produkovať významné vibrácie. Kľúčovým typom nedokonalosti súvisiacim s problémami hluku je vlnovitosť, ktorá je popísaná ako globálne sínusové tvarové nedokonalosti na vonkajšom povrchu komponentov. Ďalšími typmi sú variácie priemerov guľôčok a excentricita klietky, ktoré spôsobujú variácie v kontaktných silách a vibrácie počas behu ložiska. Variácie priemerov guľôčok vedú k deformáciám ložiska, zatiaľ čo excentricita klietky vedie k nerovnomernému rozmiestneniu guľôčok a modulácii frekvencie. Geometrické nedokonalosti generujú vibrácie na rôznych frekvenciách, ktoré sú úmerné rýchlosti otáčania hriadeľa, a ich prítomnosť môže byť zistená vo vibračnom spektre ložiska. Tieto nedokonalosti sú zásadné pre pochopenie a predpovedanie dynamického správania ložiska [35].

3.3.2 VÝVOJ A POUŽITIE DYNAMICKÝCH MODELOV

Prvými boli kvázistatické modely, pričom kombinovali základné statické analýzy s určitými dynamickými vplyvmi. Nasledovali kvázidynamické modely, ktoré integrovali statické aj dynamické časti, čo im umožnilo lepšie modelovať prechodné javy. Avšak tieto modely stále nedokázali presne odrážať dynamické vlastnosti v reálnom čase, pretože riešili rovnice rovnováhy, ktoré sú určené pre statické podmienky.

Na základe prístupu transformácie vektorov posunutia vytvoril P. K. Gupta [36] dynamický model s viacerými stupňami voľnosti, z ktorého následne vyvinul program na analýzu ložísk nazvaný ADORE (Advanced Dynamics of Rolling Elements). V tomto modeli sú zohľadnené dynamické faktory spomenuté nižšie [36].

1. Diferenciálne rovnice pohybu - používa klasické Newtonove rovnice na opis pohybu jednotlivých komponentov ložiska. Tieto rovnice zohľadňujú všetky sily a momenty pôsobiace na každý komponent.
2. Kontaktné sily - pre výpočet kontaktných síl medzi gulŔŔkami a dráhami ložiska využíva Hertzovu teóriu kontaktu. Zohľadňuje taktiež elastické deformácie povrchu v miestach kontaktu medzi gulŔŔkami a dráhami.
3. Mazanie a trenie - simuluje vplyv maziva na kontaktné sily. EHL modeluje, ako mazivo vytvára tenký film medzi kontaktnými povrchmi, čo znižuje trenie a opotrebovanie. ZahŔňa modely na výpočet trecej sily a opotrebovania materiálu v kontaktných zónach.
4. Rovnice rovnováhy - rovnice rovnováhy používajú na výpočet okamžitých pozícií a rýchlostí jednotlivých komponentov v závislosti na pôsobiacich silách a momentoch. Tieto rovnice sa riešia iteratívne, aby sa simulovali dynamické zmeny v ložisku.

Ako bolo spomenuté vyššie, systém pracuje s viacerými stupňami voľnosti, čo umožňuje simuláciu komplexných interakcií medzi komponentmi ložiska. Každý komponent môže mať translatačné a rotačné pohyby v niekoľkých smeroch. Na riešenie diferenciálnych rovníc sú využívané numerické metódy.

V praxi sa používajú rôzne dynamické modely, ktoré nie sú také všestranné ako ADORE, ale sú zamerané na špecifické aspekty dynamických javov. Tieto modely sa často používajú na riešenie konkrétnych problémov alebo na simuláciu určitých dynamických efektov v systémoch, ako sú napríklad [37]:

1. modely pre analýzu vibrácií,
2. modely pre kontaktné sily,
3. modely pre mazanie a tribológiu,
4. modely pre tepelné efekty.

Ako príklad môže slúžiť výskum Ch. Wen-a [38] zaoberajúci sa simulovaním ložiska s poruchami na vonkajšom krúžku pri vyšších otáčkach. Tento dynamický model je schopný zaznamenať poruchy vďaka zmene v kontaktnej sile medzi krúžkami a guličkou a taktiež vďaka zmene uhlovej pozície guličky.

Ďalším typom dynamického modelovania je „bond graph modeling“. Metodika používaná na modelovanie dynamických systémov, ktorá umožňuje integrovať rôzne druhy energie do jedného modelu. Táto metóda využíva grafické reprezentácie na zobrazenie vzťahov medzi jednotlivými komponentmi systému a umožňuje sledovať tok energie v systéme. Bond grafy

sú modulárne a môžu byť ľahko rozšírené alebo spojené s inými modelmi. Tento model je použitý vo výskume C. Mishra a A. Samantaray [39]. Metodika bond graph na vytvorenie dynamického modelu bola použitá pre vytvorenie valivého ložiska valivého ložisk. Diagnostická schéma, založená na EMD (Empirical Mode Decomposition) a sledovaní poradia, bola úspešne aplikovaná na experimentálne a simulované signály, čo potvrdilo schopnosť modelu presne detegovať poruchy.

3.4 ZJEDNODUŠUJÚCE PREDPOKLADY

Pri vývoji dynamického modelu ložiska sú zavedené určité zjednodušujúce predpoklady, aby bol model matematicky a výpočtovo spracovateľný, zatiaľ čo stále zachováva dostatočnú presnosť. Tieto predpoklady sú kľúčové pre pochopenie obmedzení modelu. Sú nimi napríklad [35]:

1. Ideálna geometria komponentov - všetky komponenty majú ideálnu geometriu bez akýchkoľvek výrobných nedokonalostí.
2. Dostatočné mazanie - kontakty medzi pohyblivými časťami sú vždy adekvátne mazané.
3. Konštantné zaťaženie a rýchlosť - zaťaženie pôsobiace na ložisko a jeho operačná rýchlosť sú konštantné, čo eliminuje potrebu zohľadňovať dynamické zmeny v týchto veličinách.
4. Ignorovanie teplotných efektov – nepočíta sa s teplotnými efektmi, ktoré môžu ovplyvniť vlastnosti materiálu alebo viskozitu maziva, čo by mohlo zmeniť správanie ložiska pri rôznych pracovných podmienkach.
5. Lineárne správanie materiálov – materiály sa správajú lineárne elasticky vzhľadom k zaťaženiu.

Každý dynamický model sa zameriava na meranie iných javov a teda používa rozličné zjednodušujúce predpoklady. Pri voľbe jednotlivých predpokladov je preto potreba zabezpečiť použitie tých správnych aby nedošlo k znehodnoteniu dát.

3.5 VEDECKÉ PRÁCE ANALYZUJÚCE PORUCHY POMOCOU MSC ADAMS

3.5.1 MODELÝ DEFEKTOV GULŔŔKOVÝCH LOŽISK: ŠTÚDIA SIMULOVANÝCH A EXPERIMENTÁLNYCH ZNAKOV PORÚCH

Štúdia sa zaoberá porovnávaním nameraných dát poruchy ložisk zo syntetickými dátami získaných pomocou troch modelov:

1. 5-DOF model v prostredí MATLAB-Simulink.
2. Bond graf model spomínaný v kapitole 3.3.2.
3. Model v softvéri ADAMS.

Vedecká práca ukázala, že model ADAMS je vernejšou reprezentáciou reálnej dynamiky systému ložisk a môže byť rozšírený na simuláciu komplexných porúch ložisk, ako sú nadmerne veľké guľičky a eliptické kliečky. Model poskytuje výsledky, ktoré sú konzistentnejšie a presnejšie kopírujúce experimentálne výsledky v porovnaní s ostatnými modelmi. Tento model môže byť použitý na predikciu symptómov porúch ložisk pod rôznymi geometrickými nedokonalosťami a zaťažením. Z tejto štúdie vychádza ako najpresnejší z využitých nástrojov [40].

3.5.2 DETEKCIA LOKALIZOVANÉHO DEFEKTU NA VNÚTORNEJ DRÁHE GULŔŔKOVÉHO LOŽISKA NA ZÁKLADE MSC-ADAMS

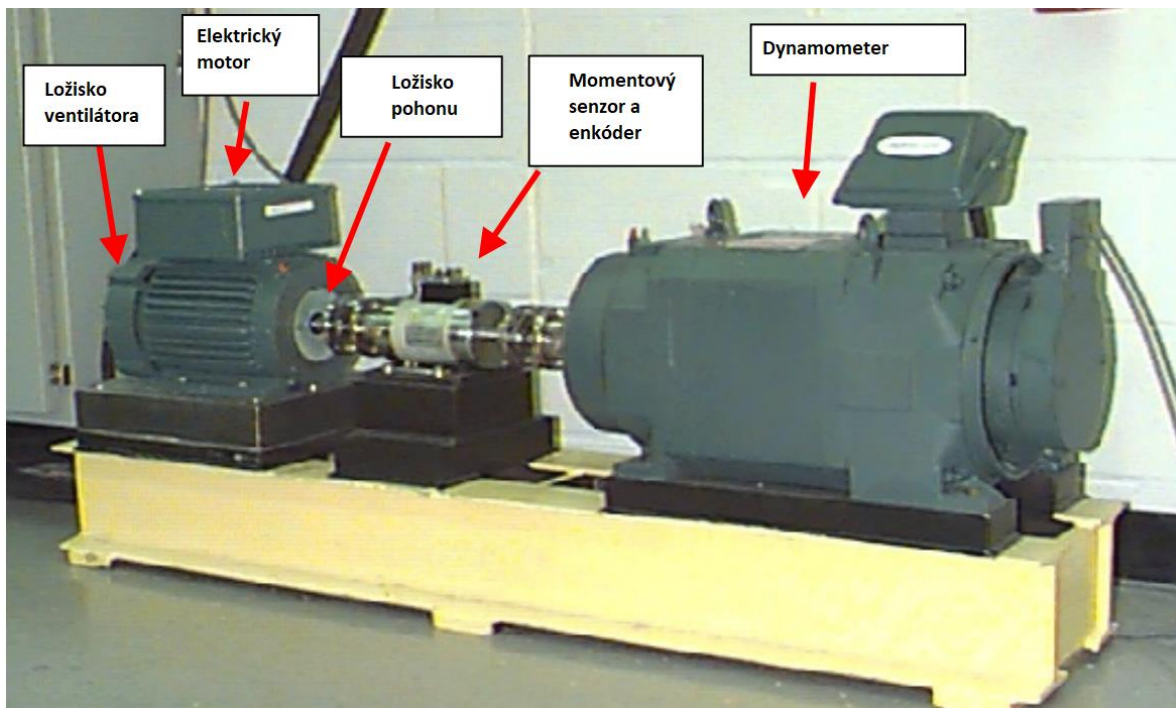
Vedecká práca pozoruje porovnania dvoch modelov valivého gulŔŔkového ložiska. Na základe výsledkov z dynamického modelu bol vyvinutý a overený model softvéru ADAMS. Tento numerický model má schopnosť predpovedať dynamické charakteristiky ložiska s defektom na vnútornej dráhe. Štúdia jasne preukázala, že dynamický model vytvorený pomocou softvéru ADAMS je schopný účinne predikovať správanie ložiska s lokalizovaným defektom na vnútornej dráhe. Pri spracovaní vibračných signálov sa ukázalo, že metódy založené na RMS (efektívna hodnota) a špicatosti sú najvhodnejšie na detekciu týchto defektov [41].

4 VSTUPNÉ DÁTA A CIELE PRÁCE

Vstupné dáta do tejto práce boli prevzaté z CWRU. Vzhľadom na ich spracovanie a komplexnosti merania sú vhodné pre porovnanie. V nasledujúcich kapitolách je stručne opísané, akým spôsobom boli získané a následne spracované.

4.1 TESTOVACIA JEDNOTKA

Experimentálne usporiadanie, použité v štúdiu CWRU, zahŕňa 2-koňový elektromotor, ktorý poháňa hriadeľ osadený torzným senzorom a enkóderom. Hriadeľ je spojený s dynamometrom a elektronickým riadiacim systémom. Na hriadeľi sú inštalované dve ložiská: ložisko na strane ventilátora a ložisko na poháňanej strane. Oba typy ložisk sú hlboko drážkové guľôčkové ložiská SKF, model 6205-2RSH/C3 pre hnaný koniec a 6203-2RSH/C3 pre koniec na strane ventilátora (obr. 4-1), ktoré sú štandardne používané v mnohých priemyselných aplikáciách [42].



Obr. 4-1 Testovacie zariadenie ložísk na CWRU[42]

4.2 TYPY PORÚCH A ROZDELENIE DÁT

V rámci experimentu boli umelo indukované tri typy porúch: poruchy vnútorného krúžku ložiska, poruchy guľôčok a poruchy vonkajšieho krúžku ložiska. Tieto poruchy boli vytvorené pomocou elektroerozívneho obrábacieho procesu, čo umožňuje presné nastavenie veľkosti a umiestnenia porúch. Veľkosti porúch sa pohybovali od 0,18mm do 1,01mm v priemere a od 0,28mm do 3,81mm hĺbky, čo umožňuje študovať vplyv veľkosti poruchy na vibrácie a akustické emisie ložiska. Tento prístup poskytuje príležitosť na analýzu a porovnanie reakcií ložiska na rôzne typy a veľkosti defektov [42].

Dátové súbory sú rozdelené do štyroch kategórií podľa vzorkovacej frekvencie (12 alebo 48 kHz) a polohy chybného ložiska. V každej skupine sú dátové súbory pre chyby valivých prvkov a vnútorných aj vonkajších dráh. Špecifické umiestnenie porúch na vonkajšom krúžku

sa prejavujú rôznymi charakteristikami vibrácií, v závislosti od ich polohy k zaťažovanej zóne, preto sú merania v troch rôznych orientáciách a to v smere 12, 3 a 6 hodín. Poruchy vonkajšieho krúžku môžu byť buď v zóne zaťaženia alebo mimo nej, čo ovplyvňuje frekvenčné spektrum vibrácií [42].

4.3 SPRACOVANIE DÁT

Spracovaním týchto dát sa venuje vedecká práca W.A. Smitha a R.B. Randalla [29]. V tejto práci boli na súbory údajov aplikované tri diagnostické metódy. Všetky metódy používali obáľkové spektrum ako konečný diagnostický nástroj avšak pred konečným spracovaním boli použité filtračné kroky popísané nižšie.

1. Analýza obálky nefiltrovaného signálu.

Táto metóda pozostávala jednoducho z analýzy obálky signálu. Dôvodom pre aplikáciu takej jednoduchej metódy je, že v tomto prípade nie sú žiadne zjavné maskujúce zdroje.

2. Cepstrálne predzosilnenie

Táto metóda pozostávala z nasledujúcich krokov:

1. Predzosilnenie nastavuje všetkých frekvenčných zložiek na rovnakú veľkosť.
2. Analýza obálky signálu v plnej šírke pásma.

Základom jej funkčnosti je, že všetky spektrálne pásma majú rovnakú hustotu výkonového spektra, tie s väčšou impulzivitou budú dominovať v časových záznamoch a prejavovať impulzné odozvy typické pre chyby ložísk. Rezonancie sú tiež odstránené, ale to môže znamenať, že rezonancie na frekvenciách, ktoré nenesú informácie o chybách ložísk, sú menej pravdepodobné, a že zakryjú tie, ktoré ich nesú [29].

3. Referenčná metóda

1. Diskrétné náhodné oddelenie (DRS) na odstránenie deterministických (diskrétnych frekvenčných) zložiek.
2. Spektrálny kurtogram na určenie najimpulzivnejšieho pásma, nasledovaný pásmovou filtráciou.
3. Analýza obálky pásmového filtrovaného signálu

Oddelenie náhodných a deterministických zložiek bolo dosiahnuté pomocou DRS, ktoré využíva prenosovú funkciu medzi signálom a jeho oneskorenou verziou. Táto funkcia je jednotková pre frekvencie deterministických zložiek, ktoré zostávajú korelované, a blízka nule pre náhodné zložky pri správne zvolenom oneskorení. Prenosová funkcia, získaná vo frekvenčnej doméne, sa aplikuje ako filter na oddelenie týchto zložiek. Nastavenie DRS bolo určené ako: dĺžka filtra $N = 16384$ a oneskorenie $\Delta = 500$ pre údaje so vzorkovacou frekvenciou 12 kHz, a $N = 8192$ a $\Delta = 500$ pre údaje so vzorkovacou frekvenciou 48 kHz [42].

4.3.1 VÝSLEDKY PRÁCE

Zistilo sa, že niektoré záznamy boli veľmi ľahko diagnostikovateľné pomocou jednoduchej analýzy obálky nefiltrovaného signálu, zatiaľ čo iné nebolo možné diagnostikovať žiadnou z použitých metód. Ďalej sa zistilo, že len málo záznamov vykazovalo typické znaky pre daný typ chyby ložiska. Montáž testovacieho zariadenia často ovplyvnila výsledky diagnostiky viac než samotná chyba ložiska, pričom mnohé záznamy ukazovali známky mechanickej voľnosti. Niektoré záznamy tiež vykazovali veľmi nestabilné vlastnosti, kde sa chyby ložísk prejavovali len v malých častiach signálu.

4.4 CIELE PRÁCE

Cieľom tejto práce je vytvorenie parametrického MBS modelu valivých ložísk z kapitoly 4.1. vhodného na meranie a analyzovanie dát ložiskových porúch. Pre dosiahnutie týchto cieľov bolo zvolený nasledovný postup:

1. Vytvorenie parametrického modelu v softvéri Inventor schopného automatickej úpravy porúch a základných parametrov.
2. Vytvorenie MBS modelu kopírujúceho základné prvky elektromotoru s ložiskami z obrázku 5-1.
3. Porovnanie a nastavenie vlastností valivých ložísk vytvorených v softvéri Inventor s vstavanou nadstavbou v MBS softvéri.
4. Vyhodnotenie dát nameraných pomocou vytvoreného modelu.

5 PARAMETRICKÝ MODEL

V kapitole 4 sú spomenuté rôzne typy porúch a 2 typy ložísk. Z tohto dôvodu bol zvolený postup za pomoci parametrického modelu. Model je navrhnutý tak, aby bolo možné vybrať jeden typ zo zvolených ložísk. Modelu je následne možné upraviť základné parametre (vonkajší a vnútorný priemer, priemer valivého elementu, šírka, hrúbka a dráha guľčiek). Ďalšou funkcionalitou je ovládanie geometrie zakrivenia drážky, jej vôle v axiálnom a radiálnom smere, ako aj typy porúch podľa ich umiestnenia, veľkosti alebo pozícií pri vonkajšom krúžku.

Pri parametrizácii v programe Inventor sa naskytajú dve možnosti, ako daný model vytvoriť. Sú nimi metódy „zhora nadol“ alebo „zdola nahor“.

Parametrizácia zdola nahor je proces, pri ktorom sa najskôr vytvoria jednotlivé základné komponenty modelu a následne sa z nich zostavujú zložitejšie podzostavy až po výslednú zostavu. Tento prístup umožňuje rýchle a efektívne zmeny v modeli, pretože úpravy hlavných parametrov automaticky aktualizujú všetky závislé komponenty v celkovej zostave.

Parametrizácia zhora nadol sa odohráva prostredníctvom takzvaného master modelu, ktorý predstavuje komplexný model obsahujúci všetky komponenty projektu. Master model slúži ako univerzálna šablóna, z ktorej sa následne odvodzujú všetky časti a podzostavy finálneho modelu. V tomto prístupe sa všetky parametre a pravidlá definujú v master modeli, z ktorého sa následne nahrávajú do zostavy a jednotlivých komponentov.

Vzhľadom ku komplikovanosti metódy zhora nadol a nutnosti vytvárať jeden model navyše (master model), bola v tejto práci zvolená metóda zdola nahor.

Hlavnými úlohami pri vytvorení parametrického modelu ložiska sú:

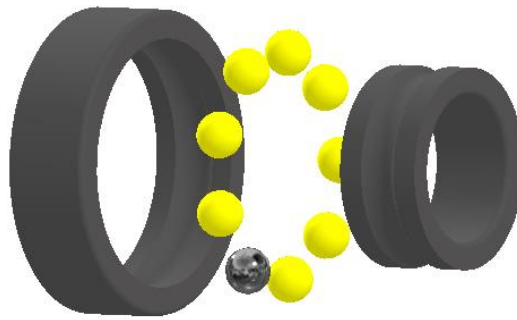
- vytvorenie jedného modelu pre obe ložiská,
- umožnenie vytvorenia všetkých variant porúch,
- vytvorenie drážky s možnosťou upravovať axiálnu a radiálnu vôľu,

ktorých realizácia je vysvetlená v kapitole 5.1.2.

5.1 PARAMETRIZÁCIA

V rámci tejto práce je časť zameraná na automatizáciu procesov realizovaná prostredníctvom modulu iLogic, ktorý slúži na vytváranie komplexných pravidiel, integrujúcich jednotlivé komponenty pomocou programovacieho jazyka Visual Basic. Využitie tohto jazyka, v ktorom je napísaný celý softvér Inventor, umožňuje efektívnu automatizáciu širokého spektra operácií v rámci návrhu a konštrukcie [35]. Tento prístup nielenže zvyšuje efektivitu práce tým, že minimalizuje potrebu manuálnej zásahy, ale zároveň zvyšuje presnosť a konzistenciu výsledných modelov pomocou redukcie ľudských chýb.

V kontexte tohto projektu boli vytvorené štyri základné komponenty: vnútorný krúžok, vonkajší krúžok, guľôčka a guľôčka s poruchou. Tieto komponenty boli následne spojené v hlavnej zostave, ako je zobrazené na obrázku 5-1. Každý z týchto komponentov bol navrhnutý s možnosťou parametrických úprav, čo umožňuje ich vzájomné prepojenie a integráciu do komplexnejšieho celku podľa definovaných pravidiel v module iLogic.



Obr. 5-1 Rozložený model ložiska 6205-2RSH/C3 (gulička s poruchou je chrómová)

5.1.1 VYTVORENIE UŽIVATEĽSKÝCH PARAMETROV

Vo vytvorenom modeli sú kľúčovým prvkom dva typy parametrov: parametre generované modelom a užívateľské parametre. Parametre generované modelom sú vytvárané automaticky a sú neoddeliteľne spojené s procesom tvorby geometrie modelu. Tieto parametre riadia hodnoty jednotlivých rozmerov a sú základným stavebným kameňom pri definovaní tvarov a veľkostí v modeli. Táto automatizácia zabezpečuje, že geometrické rozmery sú presne a konzistentne aplikované počas celého procesu návrhu.

User Parameters			
Pitch	d3,...	mm	28,4988 mm
Sírka		mm	12 mm
HrubkaVnutorna		mm	4,224 mm
VnutornyPolomer		mm	8,5 mm
PriemerGule		mm	6,74624 mm
HrubkaVonkajsia		mm	3,65 mm
VonkajsiPolomer		mm	20 mm
Axialna_vnutorne		mm	0,25 mm
Axialna_vonkajsie		mm	0,25 mm
volba_priemeru_poruchy_vonok		T...	0
volba_hlbky_poruchy_vonok		T...	0,2794
volba_loziska		T...	6203
orientacia		T...	3
Volba_priemeru_poruchy_vnutro		T...	0
Volba_hlbky_poruchy_vnutro		T...	0,2794
Umiestnenie		T...	VN
Parameter_rovina_vonok		mm	17,62252 mm
Parameter_rovina_vnutro		mm	10,87628 mm
Radialna_Vnutorne		mm	0 mm
Radialna_Vonkajsie		mm	0 mm
Volba_priemeru_poruchy_gulicka		T...	0
Volba_hlbky_poruchy_gulicka		T...	0,2794
Velkost_roviny_pod_gulickou		mm	0,95 mm
Zaoblenie_roviny		mm	3,3 mm
Pocet_guliciek	d10	ul	8 ul
Poloha_gulicky_s_poruchov	d18	d...	-45 deg
Rozmiestnenie_guliciek_pattern	d9	d...	45 deg
Natocenie_poruchy_vonok	d3,...	d...	0 deg

Obr. 5-2 Užívateľské parametre hlavnej zostavy

Na druhej strane, užívateľské parametre, ilustrované na obrázku 5-2, sú vytvárané ručne a sú určené na zvýšenie flexibility modelovania tým, že umožňujú užívateľom prispôsobiť a

kontrolovať dodatočné aspekty modelu podľa ich konkrétnych potrieb. Tieto parametre môžu byť číselné alebo textové a slúžia na parametrizáciu modelu, čo umožňuje užívateľom vkladať ich priamo do parametrov modelu. Pomocou týchto užívateľských parametrov môžu byť komponenty ovládané priamo, alebo nepriamo. Priame ovládanie je vloženie parametru do modelového parametru v zostave alebo komponente. Nepriame ovládanie obsahuje krok navyše, kedy sú parametre najskôr upravené v rámci definovaných pravidiel a následne použité na riadenie rôznych parametrov modelu.

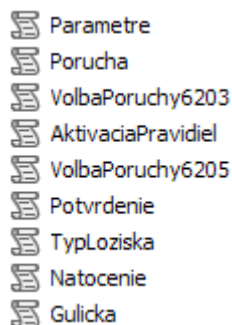
5.1.2 PRAVIDLÁ

Hlavnou časťou parametrizácie modelu ložiska sú pravidlá. Ich aplikácia sa začína jednoduchými úpravami rozmerov cez použitie rovníc, zapínanie/vypínanie komponentov a postupuje až po komplexné modifikácie a aktualizácie. Pravidlá sú formulované pomocou textových reťazcov, logických hodnôt TRUE/FALSE a využitím podmienok. Model ložiska obsahuje 9 pravidiel (Obr. 5-3), ktoré sú v následnej časti rozdelené a popísané.

Hlavným pilierom parametrizácie modelu ložiska sú pravidlá. Aplikácia týchto pravidiel sa začína jednoduchými úpravami rozmerov, kde sú využívané rovnice na menenie veľkostí, a pokračuje až k sofistikovanejším operáciám ako zapínanie a vypínanie komponentov podľa potreby.

Pravidlá sú formulované pomocou textových reťazcov, ktoré definujú špecifické parametre alebo funkcie, a logických hodnôt TRUE/FALSE, ktoré umožňujú binárne rozhodnutia o stave komponentov. Taktiež sú integrované podmienky, ktoré umožňujú pravidlám reagovať na zmeny v modeli alebo externé vstupy, čo pridáva ďalšiu vrstvu prispôbenia.

Model ložiska, ako je zobrazené na obrázku 5-3, obsahuje celkovo deväť pravidiel, ktoré sú následne detailne rozdelené a popísané v nasledujúcej časti dokumentácie.



Obr. 5-3 Pravidlá

ZMENA LOŽÍSK

Problém s vytvorením univerzálneho modelu schopného adaptovať sa na dve rôzne typy ložísk je efektívne adresovaný prostredníctvom pravidla „TypLoziska“, ako je zobrazené na obrázku 5-4. Toto pravidlo využíva podmienku „if“ odkazujúcu na užívateľský parameter „volba_loziska“, ktorý obsahuje dve možné hodnoty. Užívateľ vyberie jednu z týchto hodnôt prostredníctvom formulára, a následne dochádza k automatickej aktualizácii všetkých relevantných parametrov ložiska v závislosti na zvolenom type. Tento mechanizmus zabezpečuje, že vždy je možné sa rýchlo a jednoducho vrátiť na základné hodnoty modelu, čo poskytuje významnú flexibilitu pri modelovaní a testovaní rôznych konfigurácií.

Na obrázku 5-4 je konkrétne zobrazená časť pravidla, ktorá sa aktivuje pri výbere ložiska typu 6205. Pre alternatívny typ 6203 je mechanizmus pravidla identický, len s odlišnými hodnotami parametrov.

```
If volba_loziska = 6205 Then
    Pitch = 39.0398
    Sirka = 15
    HrubkaVnutorna = 4.67500
    VnutornyPolomer = 25 / 2
    PriemerGule = 7.940040
    HrubkaVonkajsia = 4.895
    VonkajsiPolomer = 52 / 2
    Zaoblenie_roviny = 3.8
    Velkost_roviny_pod_gulickou = 1.2
    Axialna_vnutorne = 0.3
    Axialna_vonkajsie = 0.3
    Radialna_Vnutorne = 0
    Radialna_Vonkajsie = 0
End If
```

Obr. 5-4 Pravidlo „TypLoziska“

Po úprave hodnôt sú následne parametre prepojené s jednotlivými komponentami za pomoci pravidla „Parametre“. Obsahuje príkaz na volanie parametrov z jednotlivých komponentov zostavy do pravidla v zostave. Tieto parametre je následne možné prepojiť s užívateľskými parametrami v zostave, čo zabezpečí prepojenie geometrie komponentov (Obr. 5-5).

```
'Vnútorňý priemer
Parameter("VnutornyKruhUpravaDrazka:1", "VnutornyPolomer")=VnutornyPolomer

'Vonkajší priemer
Parameter("VonkajsiKruzokUpravaDrazka:1", "VonkajsiPolomer")=VonkajsiPolomer
```

Obr. 5-5 Časť pravidla „Parametre“

VYTVÁRANIE PORÚCH

Poruchy v modeli ložiska sú riadené komplexným systémom pravidiel, zahŕňajúcich „Porucha“, „VolbaPoruchy6203“, „VolbaPoruchy6205“, „Natocenie“ a „Gulicka“. Aby bol proces ovládania porúch čo najjasnejší a najefektívnejší, je v praxi implementované väčšie množstvo pravidiel. Tento prístup umožňuje zvýšiť modularitu a prehľadnosť celého modelu, čo je kľúčové pre správne fungovanie a ľahkú údržbu systému.

Hlavným pravidlom pre ovládanie porúch je „Porucha“, ktoré funguje na podobnom princípe ako pravidlo „Parametre“. V rámci tohto pravidla sa priradujú hodnoty parametrov, ktoré špecifikujú jednotlivé poruchy priamo do komponentov modelu. Hodnoty týchto parametrov, napríklad priemeru a hĺbky, nie sú ľubovoľné. Miesto toho musí užívateľ zvoliť jednu z preddefinovaných hodnôt, ktoré sú dostupné: priemer má šesť možných hodnôt a hĺbka tri.

Pre správne priradenie týchto hodnôt je v pravidle „Porucha“ implementovaná podmienka „if“. Táto podmienka zabezpečuje, že každej predvolenej hodnote parametru je v rámci modelu priradená rovnaká hodnota vo všetkých relevantných komponentoch, ako je zobrazené na obrázku 5-6.

```

If volba_priemeru_poruchy_vonok = 0 Then
  Parameter("VonkajsiKruzokUpravaDrazka:1", "d23")= 0
End If

If volba_priemeru_poruchy_vonok = 0.1778 Then
  Parameter("VonkajsiKruzokUpravaDrazka:1", "d23")= 0.1778
End If

```

Obr. 5-6 Ukážka pravidla „Porucha“

Pravidlá „VolbaPoruchy6203“ a „VolbaPoruchy6205“ slúžia na posunutie rovín poruchy do správnej vzdialenosti. Keďže sa jedná o jeden parameter upravovaný podľa typu ložiska, je nutné mať vytvorené 2 pravidlá, ktoré sú spúšťané podľa typu zvoleného ložiska.

Podmienka rôzneho umiestnenia poruchy na vonkajšom krúžku je splnená v pravidle „Natocenie“. V tomto pravidle je naviazaná orientácia volená vo formulári na parameter otáčajúci celým vonkajším krúžkom, a tým je dosiahnutá aj rôzna pozícia poruchy.

Pravidlo „Gulicka“ má zásadný vplyv na simuláciu porúch spojených s valivými elementmi ložiska. Guličky v ložisku sú vytvorené pomocou funkcie kruhového poľa, ktoré efektívne reprodukuje jednu guličku rozmiestnenú v pravidelných intervaloch okolo osi. Keď sa rozhodne začleniť guličku s poruchou, je nutné z poľa odstrániť jednu existujúcu guličku, aby sa zachoval konštantný počet guličiek. Rovnaký proces úpravy je potrebný aj pri zmene typu ložiska, pretože model 6205 obsahuje deväť guličiek, zatiaľ čo model 6203 obsahuje iba osem. V tomto pravidle je tiež upravovaná poloha guličky s poruchou v závislosti od typu ložiska (Obr. 5-7).

```

If Volba_priemeru_poruchy_gulicka = 0 And volba_loziska= 6203 Then
  Feature.IsActive("KulickaPorucha:1", "Revolution1") = False
  Pocet_guliciek = 8
  Rozmiestnenie_guliciek_pattern = 45
  Poloha_gulicky_s_poruchov = -45
End If

If Volba_priemeru_poruchy_gulicka = 0.1778 And volba_loziska= 6203 Then
  Feature.IsActive("KulickaPorucha:1", "Revolution1") = True
  Pocet_guliciek = 7
  Rozmiestnenie_guliciek_pattern = 45
  Poloha_gulicky_s_poruchov = -45
End If

```

Obr. 5-7 Časť pravidla „Gulicka“

VYTVORENIE DRÁŽKY

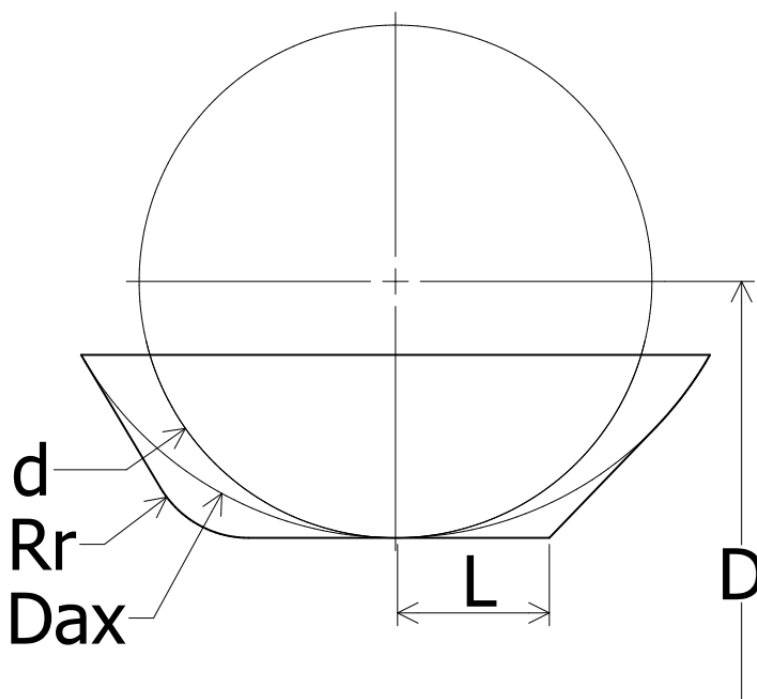
Pre vytvorenie drážky, ktorá zodpovedá parametrom spomenutým v kapitole 5, je nevyhnutné zakomponovať do rovníc viacero premenných, aby bolo možné dosiahnuť požadovanú presnosť a funkčnosť. Vytvorenie radiálnej vôle vyžaduje prídanie špecifického parametra, ktorým je posunutie kružnice Dax bližšie k stredu. Tento posun umožňuje vytvorenie potrebnej vôle pri zachovaní pôvodného tvaru drážky.

Vytvorenie axiálnej vôle je pomocou pridaného parametru (a_x) k priemeru kružnice d , ktorý vytvára vôľu na oboch stranách guličky. Sčítaním týchto parametrov vznikne kružnica Dax.

Polovicu tohto parametru je potrebné odpočítať od priemeru D aby vznikala iba axiálna vôľa a nie aj radiálna.

Posledným krokom v procese vytvárania drážky je úprava jej tvaru tak, aby zodpovedal reálnej drážke ložiska. Na dosiahnutie tohto cieľa boli vytvorené dva parametre: priamka o dĺžke $2L$ a jej zaoblenie R_r . Tieto parametre umožňujú modelovať drážku s potrebnou presnosťou a detailnosťou. Na obrázku 5-8 je znázornený tvar drážky pred (vpravo) a po zaoblení (vľavo).

V tomto prípade bolo možné upraviť rozmery pomocou jednoduchých rovníc v parametroch a pravidlá boli využité iba na ich prepojenie s jednotlivými komponentami ako bolo spomenuté aj v minulých prípadoch.



Obr. 5-8 Tvar drážky vnútorného krúžku.

OSTATNÉ PRAVIDLÁ

Pravidlá „Potvrdenie“ a „AktivaciaPravidiel“ sú používané ako spúšťače pre ďalšie pravidlá. Aktivácia pravidiel rozhoduje o tom či bude spustené pravidlo „VolbaPoruchy6203“ alebo „VolbaPoruchy6205“(Obr. 5-9). V prípade potvrdenia ide o pravidlo, ktoré odkazuje na tlačidlo vo formulári a ma za následok spustenia všetkých pravidiel po zadaní hodnôt a následné aktualizovanie zostavy (Obr. 5-9).

```

If volba_loziska = 6203 Then
    iLogicVb.RunRule("VolbaPoruchy6203")
End If

If volba_loziska = 6205 Then
    iLogicVb.RunRule("VolbaPoruchy6205")
End If

iLogicVb.RunRule("Parametre")
iLogicVb.RunRule("Porucha")
iLogicVb.RunRule("AktivaciaPravidiel")
iLogicVb.RunRule("Natocenie")
iLogicVb.RunRule("Gulicka")

iLogicVb.UpdateWhenDone = True

```

Obr. 5-9 Pravidlá „AktivaciaPravidiel“ (vľavo) a „Potvrdenie“ (vpravo).

5.1.3 FORMULÁR

Zostava modelu obsahuje formulár, ktorý je rozdelený do dvoch záložiek, umožňujúc užívateľom prístup k rôznym nastaveniam. Prvá záložka poskytuje možnosti výberu ložísk a nastavenie ich rozmerov. Druhá záložka sa zameriava na rôzne typy porúch a nastavenie zakrivenia drážky, čo je zobrazené na obrázku 5-10.

The image shows two side-by-side windows titled "Parametre ložiska".

Left window (vľavo): Shows settings for bearing faults and groove curvature. It has two tabs: "Rozmery" and "Veľkosť porúch a zakrivenie drážky". Under "Veľkosť porúch a zakrivenie drážky", there are three expandable sections:

- Porucha vonkajšia dráha:** Pozícia poruchy (3), Priemer (0), Hĺbka (0,2794).
- Porucha vnútorná dráha:** Priemer (0), Hĺbka (0,2794).
- Porucha guľička:** Priemer (0), Hĺbka (0,2794).

 Below these is a section for "Zakrivenie drážky" with fields for "Dĺžka roviny pod guľičkou" (0,95 mm) and "Zaoblenie roviny" (3,3 mm). At the bottom are buttons for "Zmena parametrov (Stlač 3x)" and "Potvrdenie voľby ložiska".

Right window (vpravo): Shows general bearing settings. It also has two tabs: "Rozmery" and "Veľkosť porúch a zakrivenie drážky". Under "Veľkosť porúch a zakrivenie drážky", there are two expandable sections:

- Všeobecné:** Volba ložiska (6203), Dráha valivého elementu (28,4988 mm), Šírka (12 mm), Priemer valivého elementu (6,74624 mm).
- Vnútorný krúžok:** Hrúbka (4,224 mm), Polomer (8,5 mm), Axiálna vôľa (0,25 mm), Radiálna vôľa (0 mm).

 Below these is a section for "Vonkajší krúžok" with fields for "Hrúbka" (3,65 mm), "Polomer" (20 mm), "Axiálna vôľa" (0,25 mm), and "Radiálna vôľa" (0 mm). At the bottom are buttons for "Zmena parametrov (Stlač 3x)" and "Potvrdenie voľby ložiska".

Obr. 5-10 Formulár obsahujúci voľbu ložísk, rozmerov (vľavo) a voľbu porúch, zakrivenia (vľavo).

V rámci formulára sú implementované dva hlavné spôsoby úpravy parametrov. Pre parametre, ktoré majú konečný počet možností rozmerov, je použitá rozbaľovacia lišta. Užívateľ si z nej vyberie potrebný parameter, čo umožňuje jednoduché a rýchle nastavenie napríklad typu ložiska alebo typu poruchy. Zvyšné parametre, ktoré vyžadujú väčšiu flexibilitu, je možné

upraviť priamo prepísaním hodnoty v určenom okne, poskytujúc užívateľovi priestor pre detailnejšie nastavenia.

V spodnej časti formulára sa nachádzajú tlačidlá. Jedno tlačidlo je určené na spustenie výmeny ložiska a druhé slúži na aktiváciu pravidla „Potvrdenie“, spomenutého vyššie. Pre správnu funkciu je potrebné najskôr zvoliť ložisko a následne meniť jednotlivé parametre. Môže za to fakt, že tlačidlo voľba ložiska je priamo napojené na pravidlo „TypLoziska“ a tým pádom vždy automaticky premení všetky hodnoty na tie, ktoré sa nachádzajú v pravidle, čo by zabránilo užívateľovi meniť jednotlivé parametre.

Tlačidlo „Zmena parametrov“ obsahuje aktiváciu zvyšných pravidiel, čím zabraňuje nechcenej aktivácii pravidla „TypLoziska“ pri upravovaní iných parametrov. Posledným krokom pre zabezpečenie správnej funkcie formulára je potreba stláčať tlačidlo „zmena parametrov“ viacnásobne po každej zmene, aby sa zabezpečila aktualizácia zostavy a synchronizácia všetkých zmien.

6 MULTI-BODY MODEL

V reakcii na požiadavku presného simulovania podmienok opísaných v experimente zmienenom v štvrtej kapitole bolo nevyhnutné vyvinúť podrobný model, ktorý kopíruje základné komponenty motoru a mechanizmus uloženia ložísk. Tento model bol navrhnutý s cieľom optimalizovať a verifikovať teoretické predpoklady experimentu pomocou simulácie v softvéri MSC ADAMS.

ADAMS je pokročilý softvérový balík, ktorý slúži na simulačnú analýzu mechanických systémov a ich dynamiky. Ide o popredný nástroj na trhu určený predovšetkým na modelovanie a analýzu pohybu a sily v rôznych mechanických konštrukciách. ADAMS poskytuje inžinierom a dizajnérom schopnosť detailne simulovať fyzikálne správanie komplexných mechanických systémov a to bez potreby fyzického vytvárania prototypov, čím sa značne znižujú náklady a čas potrebný na vývoj produktov.

Software umožňuje tvorbu realistických modelov s variabilnými stupňami voľnosti, ktoré môžu zahŕňať pevné telesá, flexibilné komponenty a rôzne typy spojov, ako sú kĺby, pružiny a tlmiče. S týmito nástrojmi môžu používatelia analyzovať rôzne fyzikálne aspekty, vrátane kinematiky, statickej a dynamické analýzy, ako aj sledovať reakčné sily a momenty vo vzťahu k rôznym záťažovým testom.

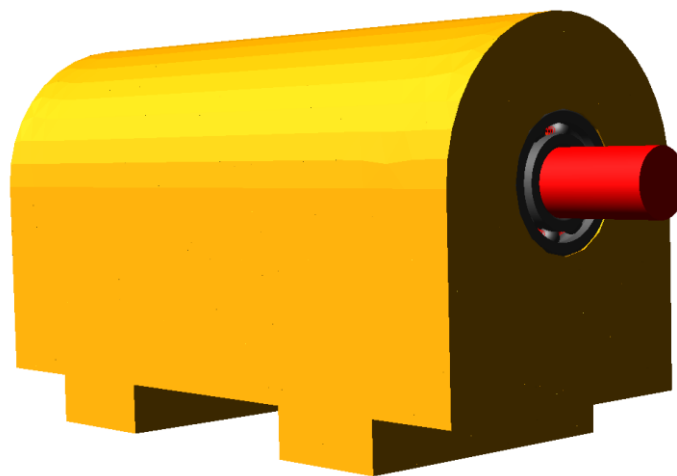
ADAMS je integrovaný s rôznymi inými softvérovými nástrojmi, čo umožňuje jeho použitie v širšom kontexte inžinierskeho dizajnu a simulácie. Jeho flexibilita a schopnosť integrácie s CAD systémami umožňuje používateľom importovať geometriu priamo z dizajnových nástrojov a transformovať ju na dynamické modely, čo zjednodušuje prechod medzi dizajnom a analýzou.

Vďaka týmto funkcionalitám sa MSC ADAMS stal neoceniteľným nástrojom v automobilovom priemysle, leteckej a vesmírnej technike, obrannej technike a ďalších odvetviach, kde presné dynamické simulácie a analýza pohybu hrajú kľúčovú úlohu v inovácii a optimalizácii produktov[43].

6.1 ZLOŽENIE MODELU

V ADAMS-e bol vytvorený zjednodušený model, ktorý reprezentuje časť meracej stanice, ako je zobrazené na obrázku 4-1. Tento model zahŕňa základné mechanické komponenty ktorými sú rotačná časť elektromotoru, ložiská, hriadel' a stator elektromotoru, čo je podrobne ilustrované na obrázku 6-1. Model je navrhnutý tak, aby simuloval reálne operácie a funkcionality zariadenia.

Aby bolo možné modely ložísk plne integrovať do simulačného prostredia MSC ADAMS, bolo potrebné exportovať ich vo formáte parasolid, čo si vyžadovalo použitie softvéru Inventor 2022 alebo staršieho, keďže novšie verzie boli nekompatibilné z hľadiska funkčnosti súborov. Tento prístup zabezpečil, že model bude presne odpovedať požiadavkám simulácie a experimentu.



Obr. 6-1 Model vytvorený v ADAMS-e. V hornej časti sa nachádza hriadeľ s ložiskami a rotačnou časťou motoru bez statoru, v dolej časti sa nachádza celý model.

6.1.1 KOMPONENTY A VÄZBY

Model je koncipovaný z celkovo 24 rôznych častí, pričom v simulačnom softvéri MSC ADAMS sú priamo modelované iba tri základné komponenty: hriadeľ, stator a rotačná časť elektromotoru. Zostávajúcich 21 častí predstavujú komponenty ložísk. Tieto časti nie sú importované z Inventoru.

Komponenty sú ďalej ovládané väzbami a silovými účinkami. Medzi základné typy väzieb a silových účinkov patria bushing, kontakt, pevný spoj (fixed joint) a pružina.

BUSHING

Bushing, je flexibilná väzba, ktorá umožňuje obmedzený pohyb medzi dvoma komponentmi. Táto väzba typicky poskytuje radiálnu a axiálnu flexibilitu, zatiaľ čo odoláva krútiacim a iným silám.

KONTAKT

Kontaktné väzby v ADAMS-e umožňujú simuláciu interakcie medzi telesami, ktoré sa môžu vzájomne dotýkať alebo naraziť. Tieto väzby sú kritické pre analýzu systémov, kde je kontakt medzi komponentmi nevyhnutný.

PEVNÝ SPOJ

Pevný spoj je najzákladanejšia forma väzby v ADAMS-e, ktorá kompletne eliminuje všetky stupne voľnosti medzi dvoma alebo viacerými spojenými telesami. Tento typ spoja sa používa, keď je potrebné, aby boli komponenty úplne statické voči sebe.

PRUŽINA

Pružina v ADAMS-e poskytuje modelovanie pružných silových účinkov medzi telesami. Pružiny môžu byť konfigurované s rôznymi charakteristikami, vrátane konštanty pružnosti, predpätia a tlmenia.

Vo finálnej verzii modelu je použitých 61 väzieb a silových účinkov.

6.1.2 ULOŽENIE

ROTAČNÁ ČASŤ MOTORA

Rotačná časť motora je v simulačnom modeli navrhnutá tak, aby slúžil predovšetkým ako závažie. Úlohou je zabezpečiť, aby boli v modeli adekvátne reprezentované rotačné sily, ktoré by v reálnych prevádzkových podmienkach motor vytváral. V modeli je integrovaný s hriadeľom prostredníctvom pevného spoja, čo znamená, že medzi týmito dvoma komponentami neexistuje žiadna relatívna pohyblivosť.

LOŽISKÁ

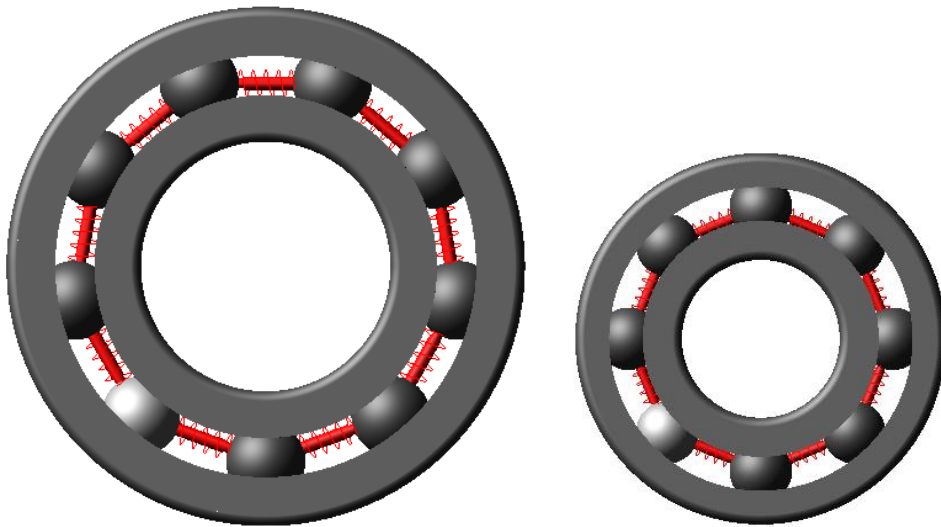
Ako už bolo spomenuté, geometria ložísk je importovaná. V prípade každej guličky v ložiskách je implementovaný systém dvoch kontaktov: prvý kontakt je medzi guličkou a vnútorným krúžkom a druhý medzi guličkou a vonkajším krúžkom. Tieto kontakty umožňujú guličkám voľne sa otáčať. Problematika kontaktov a ich tuhostí je riešená v kapitole 6.1.3.

Kvôli zjednodušeniu geometrie modelu nebol vytvorený kreslený model klietky guľčiek, ktorý by v reálnom ložisku udržiaval guľčky na ich miestach a zabezpečoval ich rovnomerné rozloženie. Namiesto toho boli v modeli použité pružiny, ktoré simulujú funkciu tejto klietky tým, že udržiavajú guľčky v správnej polohe a zabráňujú ich vzájomnému dotyku alebo zaseknutiu aj pri vysokých otáčkach alebo zaťažení. Parametre pružín sú zobrazené v tabuľke 6-1.

Parameter	Hodnota
Tuhosť	$1 \cdot 10^4$ N/mm
Tlmenie	10 N*s/mm

Tab. 6-1 Parametre pružín

Ilustrácia modelov ložísk je znázornená na obrázku 6-2.



Obr. 6-2 Model ložiska 6205-2RSH/C3 vľavo a 6203-2RSH/C3 vpravo.

STATOR ELEKTROMOTORU

Model pripevnený k zemi (groundu) pomocou štyroch bushingov, ktoré sú umiestnené na nohách. Tieto bushingy slúžia pre upevnenie celej zostavy v priestore, ale nezabraňujú vytvoreniu vibrácií, ako je to v prípade pevného spoja. Jednotlivé hodnoty parametrov bushingu sú v tabuľke 6-2. Bushing v tomto prípade simuluje pevný spoj, čo znamená, že hodnoty sú vo všetkých osiach rovnaké.

Parameter	Hodnota
Translačná tuhosť	$1 \cdot 10^8$ N/mm
Translačné tlmenie	1 N·s/mm
Rotačná tuhosť	$1 \cdot 10^8$ N·mm/deg
Rotačné tlmenie	1 N·s·mm/deg

Tab. 6-2 Parametre bushingov na púzdre

Ložiská sú spojené s konštrukciou pevným spojom prostredníctvom ich vonkajších krúžkov. To znamená, že všetky vibrácie sú prenášané priamo do statoru a je možné ich namerať. Stator je jedným z dvoch komponentov v modeli, ktorý je pružným telesom. Jeho úlohou je absorbovať a rozptyľovať energetické šoky a vibrácie, čo zabraňuje ich prenosu medzi ložiskami a zvyškom konštrukcie a vďaka tomu je možné ich merať bez väčšieho vplyvu ložísk medzi sebou. Model statoru elektromotoru je zobrazený na obrázku 6-3.



Obr. 6-3 Rez modelom statoru

HRIADEL'

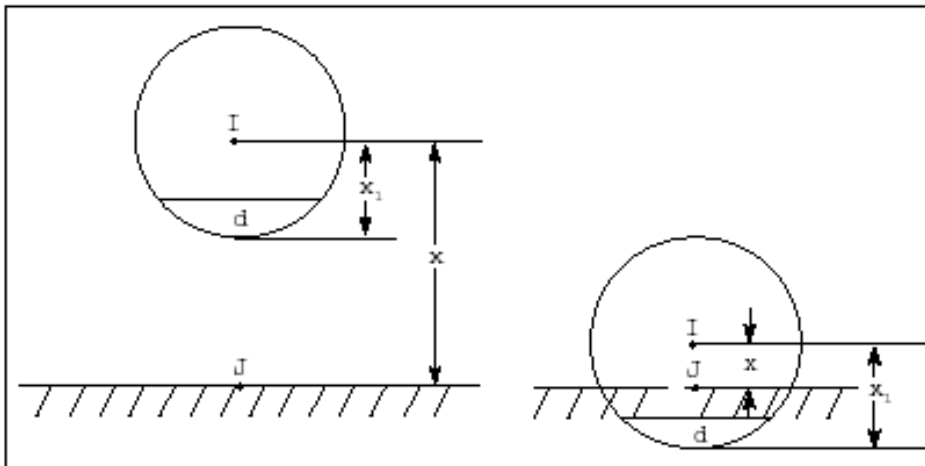
Druhým pružným telesom je hriadeľ. Hriadeľ je konštruovaný s dvoma rôznymi priermi, čo umožňuje montáž dvoch typov ložísk s odlišnými veľkosťami (Obr. 6-4). Každé ložisko je spojené s hriadeľom prostredníctvom vnútorného krúžku. Tieto vnútorné krúžky sú pripojené k hriadeľu pomocou pevného spoja. Ďalej sa na hriadeľi nachádza rotačný pohyb, ktorým je možné ovládať rýchlosť otáčania.



Obr. 6-4 Hriadeľ s vnútornými krúžkami

6.2 KONTAKTY LOŽÍSK

Kontakty medzi guľôčkami a dráhami v ložiskách sú charakterizované ako spojenia typu "tuhé na tuhé". Tuhosť a tlmenie týchto kontaktných bodov sú analyzované a definované s využitím Hertzovej teórie kontaktu. Táto teória umožňuje odvodiť tlmenie a tuhosť na základe zakrivenia dotýkajúcich sa povrchov a materiálových charakteristík, ktoré ovplyvňujú mieru deformácie pod zaťažением. Na detekciu kontaktu ADAMS využíva koncept slave node (uzly otroka)-master surface (hlavný povrch), známy z metódy konečných prvkov. Uzly a povrchy využívané na tento účel sú získané diskretizáciou objemu tuhých telies. Následne je sledovaná vzdialenosť uzlov otroka od hlavného povrchu [44].

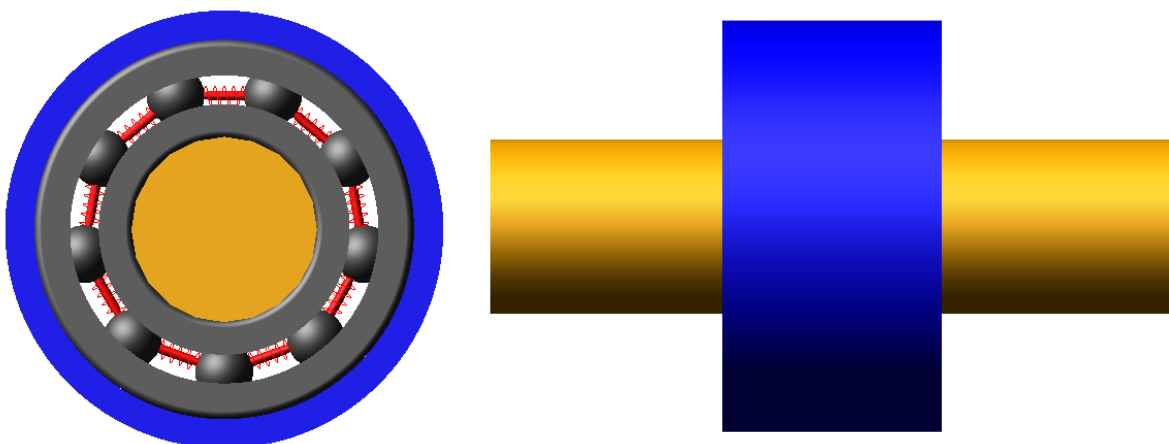


Obr. 6-5 Příklad kontaktu „tuhé na tuhé“ v ADAMS-e [44].

Funkcia IMPACT (rovnica 6.1) sa aktivuje, keď vzdialenosť medzi markerom I a J klesne pod dĺžku x_1 , teda keď dve časti narazia. Pokiaľ je vzdialenosť medzi značkami I a J väčšia ako x_1 , sila je nulová. Príkladom systému, ktorý môžete modelovať s funkciou IMPACT, je guľa padajúca smerom k zemi zobrazená na obrázku 6-5. Sila má dve zložky, zložku tuhosti a tlmiacu zložku. Zložka tuhosti je úmerná K a je funkciou preniknutia markeru I do voľnej vzdialenosti od markeru J. Zložka tuhosti pôsobí v smere opačnom ako je smer penetrácie. Tlmiaca zložka sily je funkciou rýchlosti penetrácie. Aby sa zabránilo diskontinuite v tlmiacej sile pri kontakte, koeficient tlmenia je podľa definície kubickou stupňovitou funkciou preniknutia. Takže pri nulovom preniknutí je koeficient tlmenia vždy nulový. Koeficient tlmenia dosahuje maximum R , pri používateľom definovanom preniknutí C [44].

$$IMPACT = \begin{cases} \max(0, K(x_1 - x)^e - STEP(x, x_1 - C, R, x_1, 0)\dot{x}) & \text{if } x < x_1 \\ 0 & \text{if } x \geq x_1 \end{cases} \quad (6.1)$$

Kvôli správne fungovaniu modelu a možnosti zbierania dát bolo potrebné nastaviť tuhosti a geometriu ložiska tak, aby výsledky odpovedali reálnym hodnotám. Hodnoty boli porovnávané s hodnotami analytického výpočtu tuhosti kontaktu z kapitoly 3.1, hodnotami zo softvéru ANSYS a z nadstavby „Machinery Bearings“ v ADAMS-e.



Obr. 6-6 Zjednodušený model na simuláciu tuhostí.

Na simuláciu tuhosti bol vytvorený zjednodušený model, znázornený na obrázku 6-6, čo umožnilo výrazne skrátiť výpočtový čas v porovnaní s celým modelom. Tento zjednodušený model bol navrhnutý tak, aby obsahoval iba jedno ložisko a skrátenu hriadeľ, ktorá je na oboch koncoch upevnená pomocou bushingov. Tieto bushingy sú nastavené tak, aby poskytovali voľnosť pohybu výlučne v smere, v ktorom sa vykonáva skúška tuhosti.

Simulácie realizované pomocou softvéru ANSYS a nadstavby ADAMS umožnili presne určiť silu potrebnú na dosiahnutie špecifického posunutia. Na základe týchto simulácií bol vo vybranom modeli uplatnený metodicky prístup k zaťažovaniu hriadele, čím sa zabezpečilo, že korelácia medzi aplikovanou silou a výsledným posunutím je presne monitorovaná a dokumentovaná. Po aplikácii záťaže boli následne systematicky zaznamenávané a analyzované hodnoty posuvu a upravované parametre aby sa hodnoty vytvoreného modelu priblížili k hodnotám zo softvérov. V tabuľke 6.3 sú uvedené konkrétne hodnoty jednotlivých parametrov.

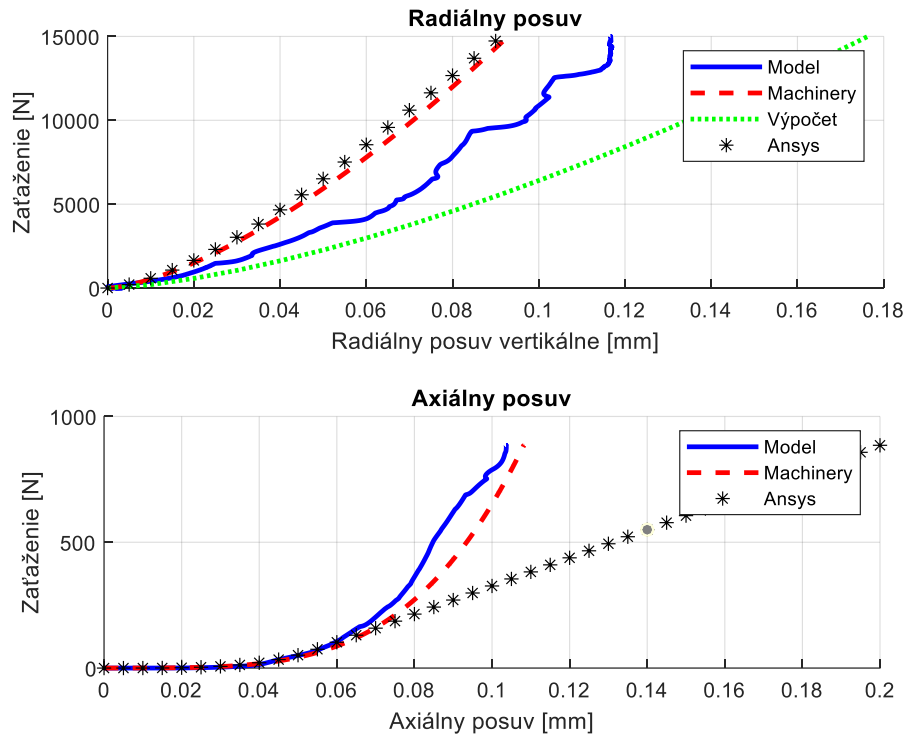
Parameter	Hodnota
Tuhosť (K)	$6 \cdot 10^6$ N/mm
Tlmenie (R)	20100,5 N·s/mm
Exponent (e)	2,1
Preniknutie maximálneho tlmenia (C)	0,1 mm
Axiálna vôľa 6205 (a_{x6205})	0,3 mm
Axiálna vôľa 6203 (a_{x6203})	0,25 mm
Zaoblenie spodnej časti drážky ložiska 6205 (Rr_{6205})	3,8 mm
Zaoblenie spodnej časti drážky ložiska 6203 (Rr_{6203})	3,3 mm

Tab. 6-3 Uživatelské parametre ovplyvňujúce tuhosť kontaktov.

Ako materiály boli použité oceľ 18CrNiMo7 na krúžky a Si3N4 na guľičky. Axiálna vôľa a zaoblenie sú vysvetlené na obrázku 5-8. Radiálna vôľa bola vo všetkých prípadoch nulová.

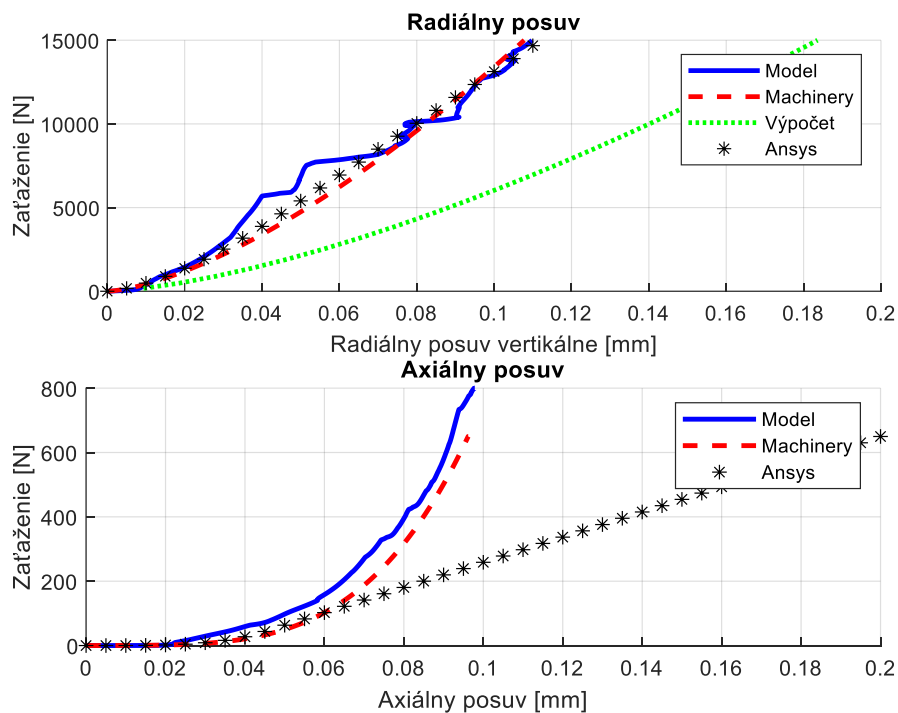
Vo výsledných grafoch sú zobrazené 4 krivky v radiálnom smere a 3 v axiálnom. V tejto práci boli simulácie zamerané najmä na porovnanie kriviek z ADAMS Machinery a vytvoreného modelu, pretože sú to jediné hodnoty vytvorené dynamickou simuláciou.

Na obrázku 6-7 môžeme vidieť výsledné tuhosti a ich porovnanie pre ložisko 6205-2RSH/C3. V hornej časti grafu je zobrazený radiálny posuv v osi y.



Obr. 6-7 Tuhosti ložiska 6205-2RSH/C3

Simulácia modelu pomerne dobre koreluje s červenou krivkou (ADAMS Machinery), hlavne v nižších hodnotách radiálneho posuvu. Model postupne sleduje zvýšenie záťaže s väčším posunom, čo naznačuje, že model adekvátne zohľadňuje tuhosť ložiska. V spodnej časti je znázornená tuhosť v axiálnom smere. Krivka modelu taktiež koreluje najmä pri nižších hodnotách posuvu, kde je ovplyvnený geometriou drážky (obr. 5-8).



Obr. 6-8 Tuhosti ložiska 6203-2RSH/C3

Na obrázku 6-8 sú vykreslené tuhosti ložiska 6203-2RSH/C3. Radiálny posuv v osi y v tomto prípade koreluje hlavne v nižších a vyšších hodnotách. V strednej časti je tuhosť mierne nadhodnotená. Čo sa týka axiálnej tuhosti, tak tá je nadhodnotená skoro v celom priebehu.

6.3 ROTÁCIA

Rotácia ložiska pri kontaktoch je ovplyvňovaná najmä trecími silami. Na popis tangenciálnych síl, ktoré vznikajú v dôsledku trenia medzi povrchmi guľičiek a krúžkov, sa používa Coulombov model trenia. Koeficienty trenia pre každú sklzovú rýchlosť sú vypočítané ADAMS-om pomocou štyroch hodnôt vstupov, a to statických a dynamických koeficientov trenia a statických a dynamických prechodových rýchlostí. Tieto rýchlosti sú prenasobené hodnotou koeficientu prechodovej rýchlosti a dané do vzťahu s veľkosťou rýchlosti spoja (V_c) kontaktu. Následne sa trenie rozdeľuje do 3 stavov. Pokiaľ platí podmienka nerovnice 6.2, tak sa jedná o statické trenie. V prípade nerovnice 6.3 ide o dynamické trenie. Ak je výsledok medzi týmito hodnotami jedná sa o trenie prechodnej oblasti. Jednotlivé hodnoty parametrov použité v modeli sú v tabuľke 6-4.

Parameter	Hodnota
Statický koeficient trenia	0.23
Dynamický koeficient trenia	0.16
Statická prechodová rýchlosť (S_{pv})	100
Dynamická prechodová rýchlosť (D_{pv})	1000
Koeficient prechodovej rýchlosti (K_{pv})	1,5
	$S_{pv} \cdot K_{pv} < V_c$ (6.2)
	$D_{pv} \cdot K_{pv} > V_c$ (6.3)

Tab. 6-4 Uživatelské parametre ovplyvňujúce trenie

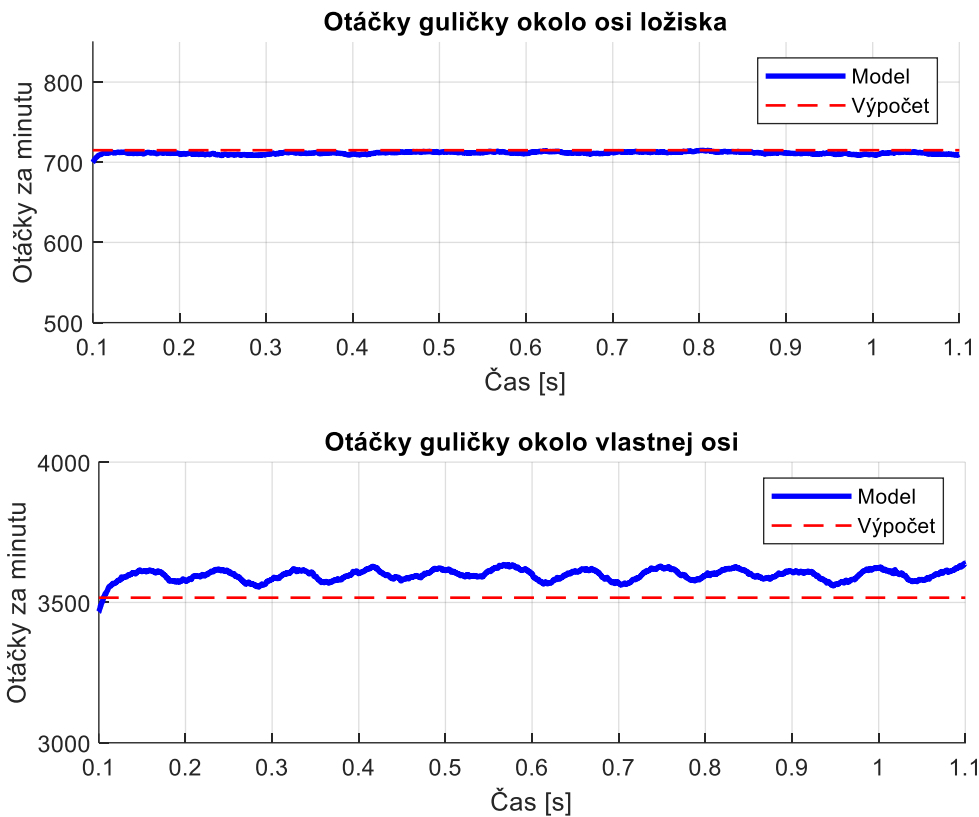
Rovnako, ako v prípade tuhosti bol použitý zjednodušený model na kontrolu rotácie guľičiek okolo vlastnej osi a aj otáčok okolo osi ložiska. Hodnoty boli porovnávané s analytickým výpočtom. Otáčky guľičky odpovedajú rovnici 6.5. Otáčky okolo osi ložiska sú vypočítané pomocou rovnice 6.6,

$$\omega_r = \frac{2 \cdot v_r}{D} \quad (6.4)$$

$$O_g = \frac{60 \cdot \omega_s}{2 \cdot \pi} \quad (6.5)$$

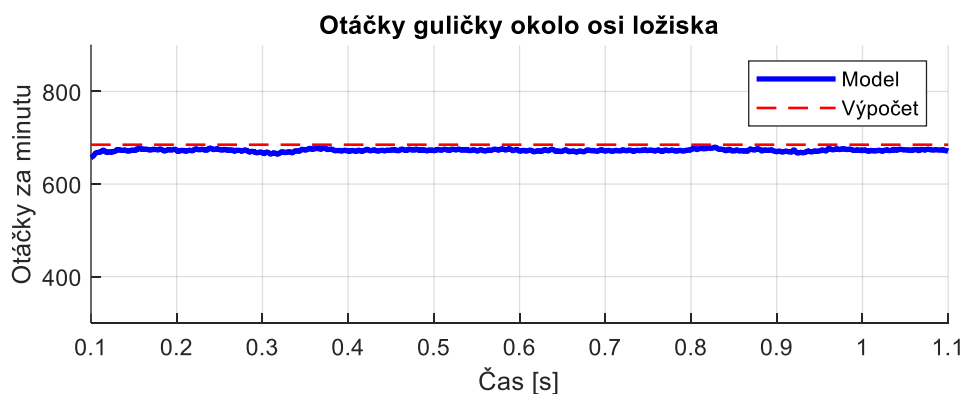
$$O_s = \frac{60 \cdot \omega_r}{2 \cdot \pi} \quad (6.6)$$

kde ω_r je uhlová rýchlosť guličky okolo osi ložiska, O_g otáčky guličky a O_s otáčky okolo osi ložiska.

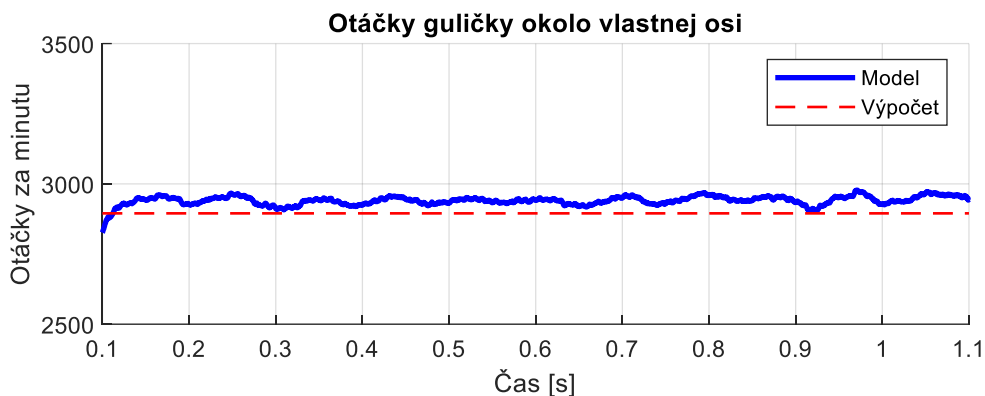


Obr. 6-9 Rýchlosti ložiska 6205-2RSH/C3

Na obrázku 6-9 je zobrazený graf porovnávajúci vypočítané otáčky s otáčkami modelu. V hornej časti môžeme vidieť vysokú zhodu oboch kriviek. V spodnej časti je rýchlosť guľičiek modelu vyššia v priemere o 1%. Taktiež je možné pozorovať nerovnomernosť rýchlosti s harmonickou zložkou odpovedajúcej jednej otáčke. Obrázok 6-10 zobrazuje rotáciu okolo osi ložiska 6203. Rotácia je nižšia, ale tento rozdiel je zanedbateľný. V prípade rotácie guľičky okolo vlastnej osi (obr. 6-11) je výsledok totožný ako pri meraní ložiska 6205, kde je taktiež harmonická zložka. V oboch prípadoch test prebiehal pri otáčkach hriadele 1796 RPM.



Obr. 6-10 Rotácia okolo osi ložiska 6203-2RSH/C3



Obr. 6-11 Rotácia guličky okolo vlastnej osi ložiska 6203-2RSH/C3

6.4 NASTAVENIE SOLVER-U

V tejto práci bol zvolený integrátor HHT z dôvodu stabilnejšieho chodu a vyššej rýchlosti výpočtov, keďže v prípade simulovania tuhostí bolo potrebné vysoké množstvo meraní. Integrátor HHT je pomenovaný a založený na metóde, ktorú navrhli Hilber, Hughes a Taylor. Táto metóda je široko používaná v komunite štruktúrálnej dynamiky pre numerickú integráciu diferenciálnych rovníc druhého rádu, ktoré sú získané na konci diskretizácie konečnými prvkami. Ak je prístup konečných prvkov lineárny, rovnice nadobúdajú tvar:

$$M\ddot{q} + H\dot{q} + Gq = F(t) \quad (6.7)$$

Hmotnostné, tlmiace a matice tuhosti, M , H a K , sú konštantné a sila F závisí na čase[44].

Merania prebiehali za čas 1,1 sekundy a pri vzorkovacej frekvencii 12 kHz. Čas bol zvolený s ohľadom na fakt, že prvých 0,1 sekundy sa roztáča hriadeľ pomocou step funkcie a aby bola dosiahnutá aspoň jedna sekunda meraní.

7 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV

V tejto kapitole sa práca zameriava na pozorovanie frekvencií a ich porovnávanie s vypočítanými dátami. V tabuľke 7-1 sú zobrazené vypočítané frekvencie jednotlivých častí ložísk, ktoré boli stanovené na základe rovníc uvedených v kapitole 2.4.2. Tieto frekvencie zahŕňajú hodnoty pre komponenty ložísk, ako sú vnútorné, vonkajšie krúžky a valivé elementy.

	BPFO	BPMF	BSP
6205 2RSH/C3	$3,585f_r$	$5,415f_r$	$2,357f_r$
6203 2RSH/C3	$3,053f_r$	$4,947f_r$	$1,994f_r$

Tab. 7-1 Frekvencie komponentov ložísk v závislosti na frekvencii otáčania. Hodnoty sú v Hz.

V tejto kapitole sa zobrazujú hodnoty z ložiska 6205-2RSH/C3. Je to z dôvodu, že obe ložiská mali podobné charakteristiky a nebolo potrebné ich vkladať dvojmo.

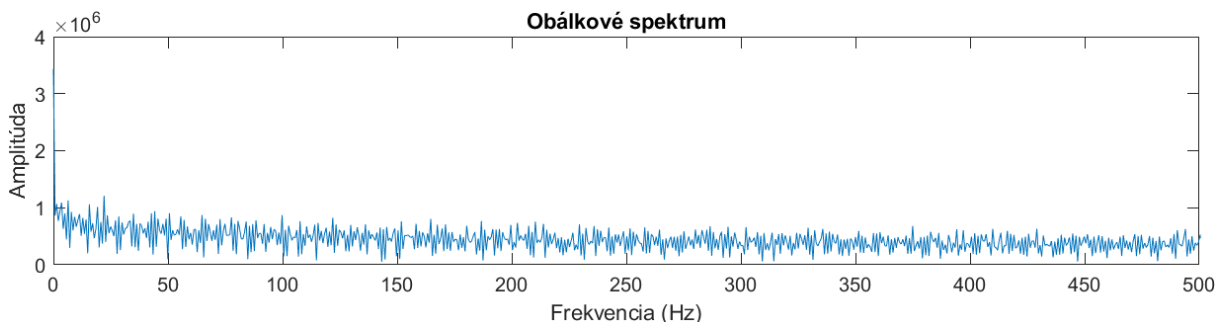
Na zjednodušenie spracovania výsledkov bola vyvinutá jednoduchá aplikácia v MATLABe, ktorá umožňuje analýzu dát pomocou obálkovej analýzy.

7.1 VÝSLEDKY VYTVORENÉHO MODELU

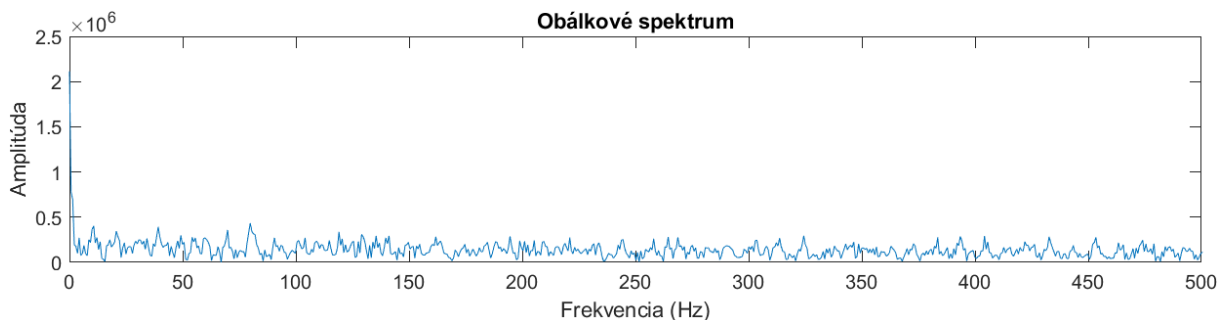
V softvéri MSC ADAMS boli spustené simulácie celého systému popísaného v kapitole 6 s rôznymi verziami porúch spomínaných v kapitole 4.2. Následne boli spracované a vyhodnotené.

Na obrázkoch sú zobrazené grafy obálkového spektra poruchy na vnútornom krúžku (obr. 7-1) a na vonkajšom krúžku (obr. 7-2) s priemerom poruchy 1,016 mm.

Z grafov je možné vidieť, že frekvencie poruchy sa buď v meraniach nevyskytujú alebo splyvajú s ostatnými vibráciami. Z toho dôvodu nie je možné s istotou určiť, či sa dané poruchy nachádzajú na ložisku.

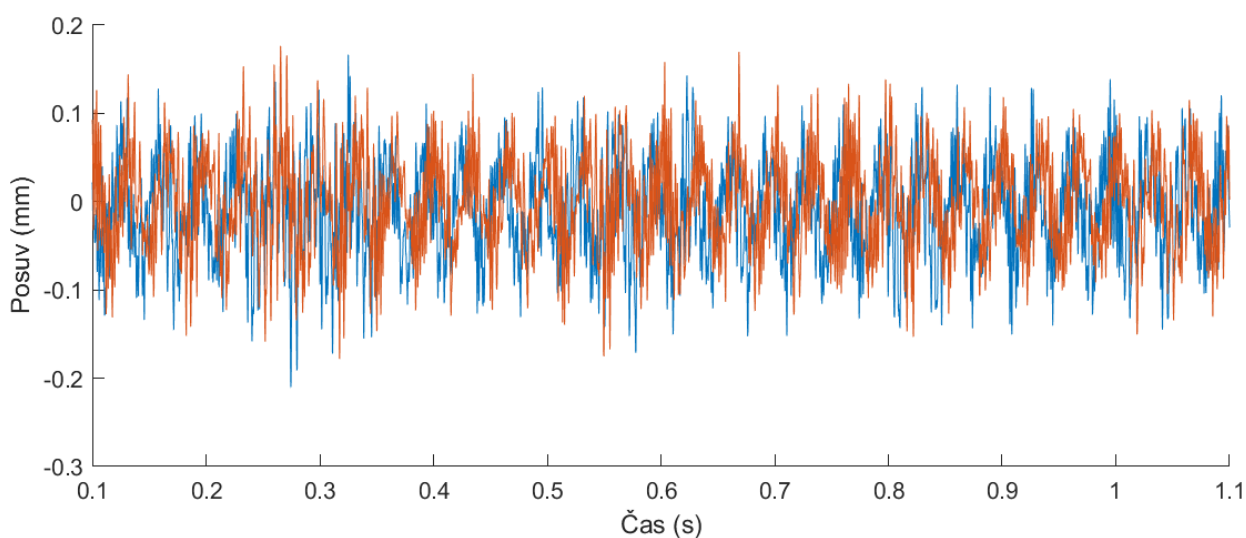


Obr. 7-1 Obálkové spektrum vibrácií vnútornom krúžku.



Obr. 7-2 Obálkové spektrum vibrácií vnútornom krúžku.

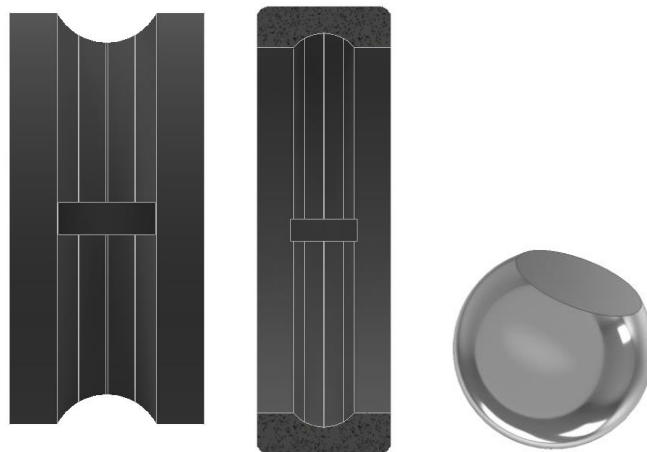
Ďalej sa ukázalo, že kvôli použitiu pružných telies dochádzalo k veľkým posuvom vonkajšieho krúžku, čo taktiež vplývalo na dáta vibrácií. Tieto posuvy korelujú s frekvenciou otáčania hriadele. Vplyvom posuvov sa mení tlak na guľičky medzi krúžkami, a to ovplyvňuje pravidelnosť vibrácií prechodu guľičky cez poruchu. Posuvy sú zobrazené na obrázku 7-3.



Obr. 7-3 Posuv vonkajšieho krúžku v radiálnych osách.

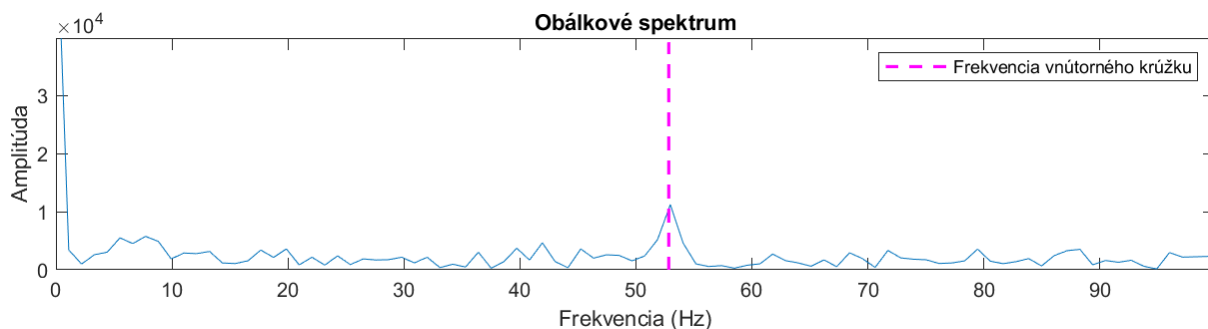
7.2 ÚPRAVA PORÚCH

Kvôli výsledkom zobrazeným v predošlej časti a nedostatočným budeniam pri prechode guľičky cez drážku boli vytvorené väčšie poruchy, aby boli lepšie rozpoznateľné. Poruchy boli vytvorené ako drážky s rozmermi 6x2x1 mm v prípade krúžkov a orezanie o 1mm v prípade guľičky (obr. 7-4).



Obr. 7-4 Komponenty s novými poruchami

Aby sa zamedzilo nepriaznivým vplyvom pochádzajúcich zo zostavy, bolo meranie prevedené iba s modelom ložiska. Rotácia bola vytvorená na vnútornom krúžku a pre jednoduchšie pozorovanie spomalená na 10Hz. Vonkajší krúžok bol prichytený bushingom, aby bolo možné sledovať vibrácie. Na obrázku 7-5 je vidieť frekvencia poruchy na vnútornom krúžku. Testy poruchy na guľičke a vonkajšom krúžku nepreukázali žiadne frekvencie, ktoré by odpovedali ich poruchám.

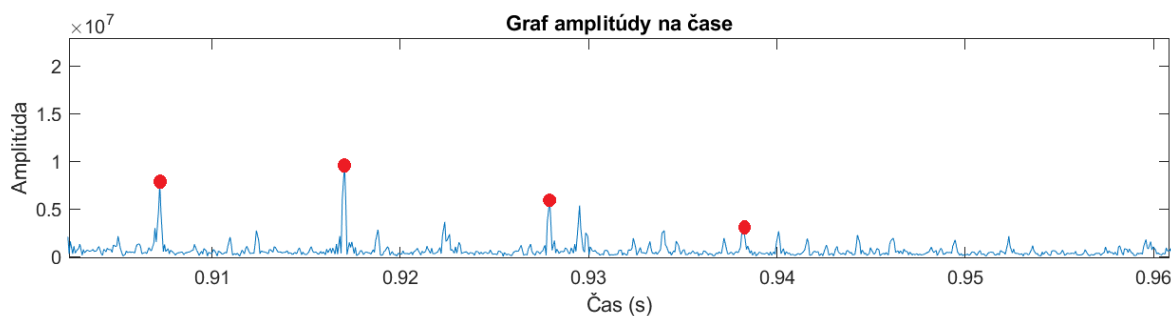


Obr. 7-5 Výsledok po úprave poruchy ložiska.

Obálkové spektrum odhalilo vibrácie s frekvenciou, ktorá odpovedá frekvencii poruche na vnútornom krúžku.

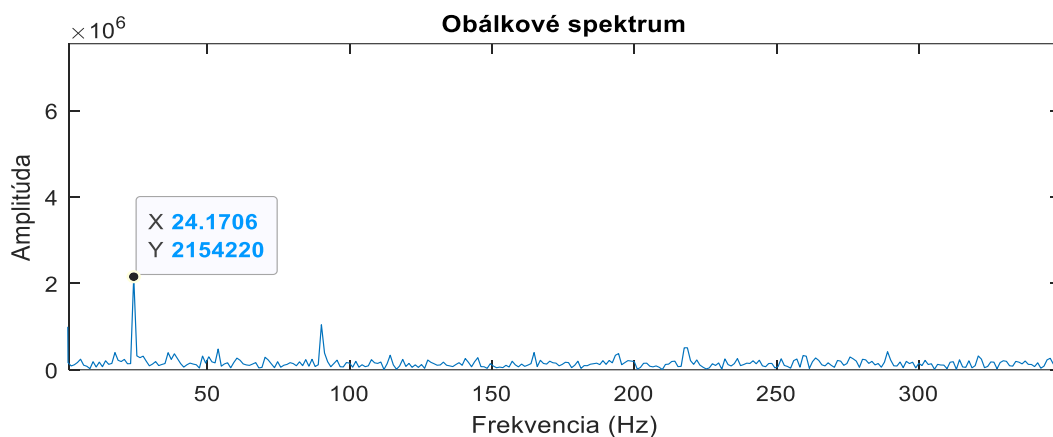
Následne bolo ložisko opäť vložené do celkového modelu, avšak z tohto modelu bol odstránený stator a vonkajšie krúžky ložiska boli prichytené bushingom. Taktiež bola zmenená hriadeľ z pružného na tuhé teleso. Bolo tak učené, aby nevznikali príliš veľké posuvy ako v prípade zobrazenom na obrázku 7-3.

Výsledky v obálkovom spektre boli nepreukázateľné ako pre pôvodné merania. Po preskúmaní časového grafu vonkajšej poruchy uloženej v smere gravitácie (šiesta hodina) boli na niektorých miestach odhalené amplitúdy, ktorých perióda odpovedá perióde poruchy na vonkajšom krúžku (obr. 7-6). Meranie prebiehalo pri otáčkach o frekvencii 30Hz.



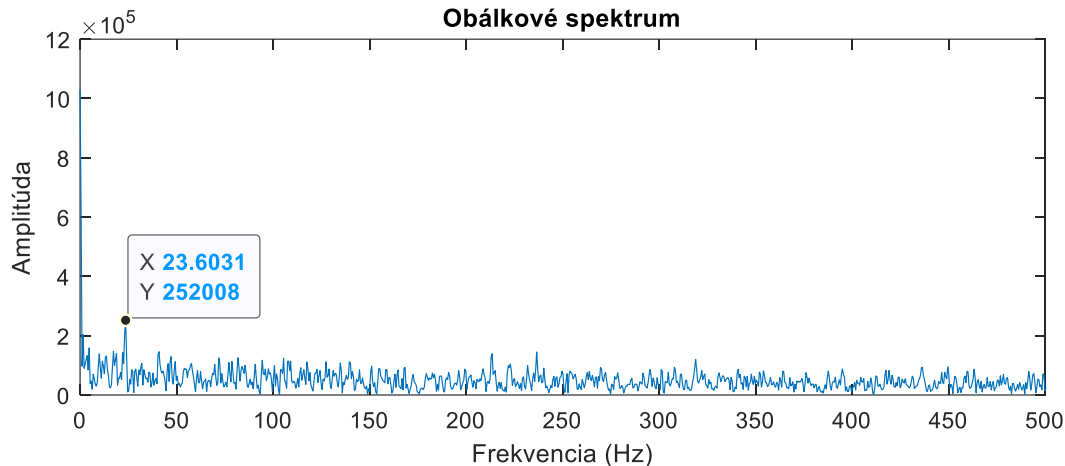
Obr. 7-6 Amplitúda v čase. Červené bodky označujú amplitúdy pri prechode cez poruchu na vonkajšom krúžku.

Vďaka predošlému zisteniu bolo opäť testovaný iba model ložiska s vonkajšou poruchou v smere gravitácie a bolo zistené, že veľkosť tlmenia v kontaktoch negatívne ovplyvnila výsledky. Tlmenie bolo zvolené na simuláciu tuhosti ložiska, avšak malo nežiadúci efekt na výsledky, pretože vibrácie ním boli ovplyvnené zníženým kmitaním. Na obrázku 7-7 je zobrazený model s tlmením 1 N·s/mm. Z grafu je zrejmé, že pri frekvencii otáčania 6,5 Hz je dominantná frekvencia 24,17 Hz, zatiaľ čo vypočítaná hodnota pre túto rýchlosť je 23,3 Hz.



Obr. 7-7 Obálkové spektrum poruchy na vnútornom krúžku pri tlmení kontaktu 1 N·s/mm.

Obrázok 7-8 zobrazuje meranie za rovnakých podmienok, avšak s tlmením zvýšeným na 1000 N·s/mm. Frekvencie poruchy na vonkajšom krúžku sú stále zreteľné, avšak zvýšené tlmenie spôsobilo, že špičkové hodnoty sú nižšie a začínajú splývať s ostatným signálom.



Obr. 7-8 Obálkové spektrum poruchy na vnútornom krúžku pri tlmení kontaktu 1000 N·s/mm.

Ako bolo spomenuté vyššie s plným tlmením sa nepodarilo namerať žiadne frekvencie odpovedajúce tejto poruche.

7.3 DISKUSIA

Po otestovaní modelu a spracovaní výsledkov sa ukázalo, že daný model nie je vhodný na simuláciu vibrácií porúch ložísk. Analýza modelu odhalila, že jednou z príčin bolo nastavenie tuhosti. V manuáli je písane že tlmenie by malo byť približne 1% tuhosti v kontakte, avšak v štúdiách sa často vyskytuje aj hodnota nižšia ako 0,01%. V prvom prípade bolo tlmenie približne 0,35% tuhosti a výsledky preukázali že je to príliš vysoká hodnota. Výsledky bolo možné pozorovať približne od 0,015% a hodnoty 1000 N·s/mm.

Na základe skúseností získaných v rámci tejto práce možno konštatovať, že požadovaná tuhosť zostavy skúmaná v kapitole 6.2 môže byť dosiahnutá aj inými kombináciami parametrov, nielen kontaktu ale aj tvaru drážky. Tieto zmeny majú výrazný vplyv na výpočtový čas.

Ďalším významným faktorom bolo použitie pružín ako zjednodušenej náhrady klietky. Toto zjednodušenie ovplyvňuje translačné pohyby guľičiek, ktoré sú týmto systémom spomaľované a trvá dlhší čas kým zareagujú na zmenu. V budúcich prácach by mala byť použitá klietka čo ale bude mať nepriaznivý vplyv na rýchlosť výpočtov kvôli zvýšenému počtu kontaktov.

Merania boli vykonávané z dôvodu časovej náročnosti vo vzorkovacej frekvencii 12 kHz a integrátorom HHT čo má taktiež výrazný vplyv na namerané dáta. Pri meraní bolo zistené že pružné modely komponentov komplikovali merania ich vysokými posuvmi pri pevnom spoji (obr. 7-3). Preto by bolo vhodné v ďalšej práci najskôr vyladiť ložisko na požadované parametre a následne sa zmerať na pružné telesá, ktoré budú mať taktiež veľký vplyv na realnosť dát.

Napriek všetkým problémom práca preukázala, že meranie vibrácií porúch ložiska je možné pomocou multi-body systému, avšak je potrebné brať do úvahy obmedzenia spôsobené prvkami použitými pri vytváraní modelu.

ZÁVER

Na úvod sa táto práca zaoberá základnou funkčnosťou a použitím valivých ložísk. Vysvetľuje, ako valivé ložiská prenášajú sily medzi pohyblivými a nepohyblivými časťami strojov a redukovujú klzné trenie. Analyzuje rôzne typy porúch, ako sú plošné a lokálne poruchy, ktoré môžu ovplyvniť funkčnosť ložiska a celého stroja. Diskutuje o zaťažení, opotrebení a trvanlivosti ložísk.

Diagnostika ložísk je dôležitá na odhaľovanie porúch a predchádzanie fatálnym následkom. V tejto práci je popísaných niekoľko metód diagnostiky. Vysvetľuje spektrálnu a obáľkovú analýzu ako pokročilé techniky na identifikáciu porúch ložísk pomocou analýzy frekvenčných spektrálnych dát.

Na diagnostiku nadväzujú matematické modely ložísk. Je spomenutý ich stručný vývoj, základné použitie a aktuálne modely. Práca sa zaoberá popisom teoretického rámca, ktorý využíva matematické rovnice a vzťahy na opis chovania a vlastností guľôčkového ložiska pod rôznymi zaťažzeniami a v rôznych pracovných podmienkach. Vysvetľuje Hertzovu teóriu elastického kontaktu a jej použitie pri výpočte kontaktných síl a deformácií v ložiskách.

Vstupné dáta do tejto práce, prevzaté z CWRU, obsahujú rozsiahle merania vibrácií pre rôzne typy porúch ložísk. Táto časť vysvetľuje, ako boli tieto dáta získané, spracované a použité na modelovanie a analýzu jednotlivých porúch.

Parametrický model ložiska bol vytvorený tak, aby spĺňal požiadavky zo vstupných dát a bol používateľsky jednoduchý. Tento model umožňuje simulovať rôzne geometrické nedokonalosti a ich vplyv na dynamické vlastnosti ložísk.

Vytvorenie multi-body modelu ložiska bolo porovnávané a nastavované podľa vstavanej nadstavby softvéru ADAMS. Popisuje vytvorenie jednotlivých komponentov modelu, väzby a kontakty v ložisku.

Nasleduje vyhodnotenie výsledkov simulácií a diskusia o možných zlepšeniach modelu, kde boli preskúmané výsledky simulácií, pričom boli identifikované možnosti na zlepšenie diagnostiky a predikcie porúch, čím sa prispieva k vývoju spoľahlivejších diagnostických nástrojov. Simulačný model je pre prípadné ďalšie použitie potreba upraviť na základe poznatkov spomínaných v diskusii.

Táto práca poskytuje prehľad rôznych aspektov simulácie porúch na ložiskách. Ide o komplexnú problematiku, ktorá zahŕňa diagnostiku porúch, ich modelovanie a analýzu vplyvu na funkčnosť ložísk a celých strojov. Vytvorený parametrický a multi-body model sú efektívnymi nástrojmi pre skúmanie porúch ložísk. Mnohé poznatky uvedené v práci, sú všeobecne aplikovateľné pri analýze a diagnostike porúch ložísk.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] EL-THALJI, Idriss; JANTUNEN, Erkki. A summary of fault modelling and predictive health monitoring of rolling element bearings, *Mech Syst Signal Process*, roč. 60–61, s. 252–272, aug. 2015, doi: 10.1016/J.YMSSP.2015.02.008.
- [2] XU, Funing et al. A review of bearing failure Modes, mechanisms and causes, *Engineering Failure Analysis*, roč. 152, s. 107518, okt. 2023, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2023.107518.
- [3] GUYER, Raymond A. Jr. *Rolling Bearings Handbook and Troubleshooting Guide*. CRC Press, 1996. ISBN 978-0801988714.
- [4] BEČKA, Jan. *Ložiska ve strojích*, Praha. Cit: 05. marec 2024. [Online]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/~beckajan/predn_design_KON_I_8.pdf
- [5] SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. (Richard Gordon); HARTL, Martin a VLK, Miloš. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [6] KINEX. *Montáž, demontáž a poruchy valivých ložisk*. Cit: 06. marec 2024. [Online]. Dostupné z: https://www.kinex.sk/files/Servis_montaz_demontaz_a_poruchy_valivychlozisk.pdf
- [7] HAMROCK, Bernard J. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. McGraw-Hill 1994. ISBN 978-0070259560.
- [8] NTN. *Load Rating and Life*. Cit: 06. april 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.ntn.co.jp/jimtof2004/eng/pdf/PrecisionBrgs-e/PrecisionBrgs-e-016.pdf>
- [9] TANDON, N; CHOUDHURY, A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, *Tribol Int*, roč. 32, č. 8, s. 469–480, aug. 1999, doi: 10.1016/S0301-679X(99)00077-8.
- [10] GUPTA, Pankaj; PRADHAN M.K. Fault detection analysis in rolling element bearing: A review, *Mater Today Proc*, roč. 4, č. 2, s. 2085–2094, jan. 2017, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.02.054.
- [11] LIU, Jing; SHAO, Yimin. Overview of dynamic modelling and analysis of rolling element bearings with localized and distributed faults, *Nonlinear Dynamics*, roč. 93, č. 4, s. 1765–1798, máj. 2018, doi: 10.1007/S11071-018-4314-Y.
- [12] SKF Group. *SKF bearing maintenance handbook*. Cit: 15. marec 2024. [Online]. Dostupné z: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968013be94/pdf_preview_medium/0901d1968013be94_pdf_preview_medium.pdf
- [13] Nuclear Power. *Wear Types - Classification and Differences*. Cit: 09. marec 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/failure-modes-of-materials/wear/wear-types-classification-and-differences/>

- [14] ZKL Group. Vady a poškození ložisek . Cit: 08. marec 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.zkl.cz/cs/produkty/obecne-informace-pro-konstruktery/11-vady-a-poskozeni-lozisek>
- [15] DUBOIS, André; FILALI, Oussama; BUNAR, Laurent. Effect of roughness, contact pressure and lubrication on the onset of galling of the 6082 aluminium alloy in cold forming, a numerical approach, *Wear*, roč. 536–537, s. 205179, jan. 2024, doi: 10.1016/J.WEAR.2023.205179.
- [16] Aeronautics Guinde. Aircraft Wheels Construction and Inspection. Cit: 08. marec 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.aircraftsystemstech.com /p/aircraft-wheels-aircraft-wheels-are.html>
- [17] LANGNAU, Leslie. Brinelling and Why Bearings Fail. Cit: 09. marec 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/how-bearings-fail-a-closer-look-at-brinelling/>
- [18] VASIĆ, Milan; STOJANOVIĆ, Blaža; BLAGEJOVIĆ Mirko. Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors, *Engineering Failure Analysis*, roč. 117, s. 104, nov. 2020, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2020.104898.
- [19] VENCL, Aleksandar; RAC, Aleksandar. Diesel engine crankshaft journal bearings failures: Case study, *Engineering Failure Analysis*, roč. 44, s. 217–228, sep. 2014, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2014.05.014.
- [20] Aegis. Understanding the 5 causes of bearing damage in electric motors. Cit: 15. máj 2024. [Online]. Dostupné z: <https://empoweringpumps.com/aegis-5-sources-of-bearing-damage-in-electric-motors/>
- [21] XU, Xiaolei; YU, Zhiwei. Failure analysis of GCr15SiMn steel bearing sleeve, *Engineering Failure Analysis*, roč. 13, č. 5, s. 857–865, júl. 2006, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2005.02.020.
- [22] HARRIS, Tedric A. *Rolling bearing analysis*. 4. ed. New York: John Wiley, 2001. ISBN 0-471-35457-0.
- [23] HUDÁK, Rastislav; HOLVOVÁ Patrícia. Možnosti využitia viacparametrickej diagnostiky v technickej praxi. Cit: 15. máj 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/25-2013/pdf/081-084.pdf>
- [24] MAZAL, Pavel; PAZDERA, Luboš a SMUTNÝ, Jaroslav. Identifikace kontaktního poškození materiálů a ložisek metodou akustické emise. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-3826-2
- [25] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [26] KUKLA, Pavol et al. , *Technická diagnostika a spoľehlivosť (sborník prednášok)*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2011. ISBN 978-80-02-02352-4

- [27] RANDALL, Robert B. Vibration-based condition monitoring. Wiley, 2021 ISBN 978-1119477556
- [28] WANG, Jianhong et al. Fractional envelope analysis for rolling element bearing weak fault feature extraction, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, roč. 4, č. 2, s. 353–360, apr. 2017, doi: 10.1109/JAS.2016.7510166.
- [29] SMITH, Wade A.; RANDALL, Robert B. Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study, Mechanical Systems and Signal Processing, roč. 64–65, s. 100–131, 01. december 2015. doi: 10.1016/j.ymssp.2015.04.021.
- [30] GLADIŠOVÁ, Iveta; MIHÁLIK, Jan. Modulované signály. Košice: LDIPV FEI TU 2016 ISBN: 978-80-553-2442-5
- [31] HAMROCK, Bernard J. ; DOWSON, Duncan. Ball Bearing Mechanics , NASA Technical Memorandum 1981. [Online]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19810023007/downloads/19810023007.pdf>
- [32] KINGSBURY, Edward. First Order Ball Bearing Kinematics. NASA Technical Memorandum , 1984 [Online]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/42849687.pdf>
- [33] WAGNER, Christiona et al. Full dynamic ball bearing model with elastic outer ring for high speed applications, Lubricants, roč. 5, č. 2, jún. 2017, doi: 10.3390/LUBRICANTS5020017.
- [34] WANG Mingkai et al. Dynamic modeling and properties analysis for ball bearing driven by structure flexible deformations, Tribol. Int., roč. 179, s. 108163, jan. 2023, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2022.108163.
- [35] WENSING, Jeroen A. On the dynamics of ball bearings. University of Twente, 1998. ISBN: 90-36512298
- [36] GUPTA, Pankaj, Advanced Dynamics of Rolling Elements. New York, Springer, 1984. doi: 10.1007/978-1-4612-5276-4.
- [37] PTC, Vibration Analysis, Cit: 20. máj 2024. [Online]. Dostupné z: https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r9.0/usascii/index.html#page/simulate/simulate/vibrate_top.html
- [38] WEN, Chengwei et. al. Dynamic behaviors of angular contact ball bearing with a localized surface defect considering the influence of cage and oil lubrication, Mech Mach Theory, roč. 162, aug. 2021, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104352.
- [39] MISHRA, C.; SAMATARY, A.K.; CHAKRABORTY, G. Bond graph modeling and experimental verification of a novel scheme for fault diagnosis of rolling element bearings in special operating conditions, J Sound Vib, roč. 377, s. 302–330, sep. 2016, doi: 10.1016/j.jsv.2016.05.021.

- [40] MISHRA, C.; SAMATARY, A.K.; CHAKRABORTY, G. Ball bearing defect models: A study of simulated and experimental fault signatures, *J Sound Vib*, roč. 400, s. 86–112, 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2017.04.010.
- [41] NABHAN, Ahmed; RASHED, Ahmed. Detection of localized fault in inner race of deep groove ball bearing based on MSC-ADAMS. *Journal of the Egyptian society of tribology* č. 2, April 2020, s. 23 - 39 doi: 10.21608/JEST.2020.81082.
- [42] CWRU, Dataset Cit: 20. máj 2024. [Online]. Dostupné z: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home>
- [43] ADAMS Cit: 20. máj 2024. [Online]. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/adams>
- [44] ADAMS. *Manual*. Cit: 20. máj 2024. [Online]. Dostupné z: <https://nexus.hexagon.com/documentationcenter/cs-CZ/search?q=Impact>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

ADAMS		Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems
ADORE		Advanced Dynamics of Rolling Elements
CAD		Computer-Aided design
CWRU		Case Western Reserve University
DFT		Diskrétna Fourierova transformácia
DRS		Diskrétné náhodné oddelenie
EHL		Elastohydrodynamické mazanie
EMD		Empirical Mode Decomposition
FFT		Rýchla Fourierova transformácia
FT		Fourierova transformácia
MBS		Multi-body system
δ	[mm]	Elastická deformácia
δ_{max}	[mm]	Najväčšia elastická deformácia
ψ	[-]	Eliptický integrál
ε	[-]	Eliptický integrál
φ	[°]	Uhol dotyku
ω_r	[rad]	Úhlová rýchlosť guličky okolo osi
ω_s	[rad]	Rýchlosť otáčania guľôčky okolo vlastnej osi
a_x	[mm]	Axiálna vôľa
a_{x6205}	[mm]	Axiálna vôľa ložiska 6205
a_{x6203}	[mm]	Axiálna vôľa ložiska 6203
A	[m·s ⁻¹]	Priemerná rýchlosť
$BPFI$	[Hz]	Frekvencia vnútorného krúžku
$BPFO$	[Hz]	Frekvencia vonkajšieho krúžku
BSP	[Hz]	Frekvencia guličky
C	[mm]	Preniknutie maximálneho tlmenia
d	[mm]	Priemer valivého elementu
D	[mm]	Priemer dráhy valivého elementu
Dax	[mm]	Priemer dráhy s axiálnou vôľou
D_{pv}	[mm]	Dynamická prechodová rýchlosť
e	[-]	Exponent
E'	[Pa]	Redukovaný modul pružnosti

f_r	[Hz]	Frekvencia relatívneho otáčania krúžkov voči sebe
F	[N]	Sila
F_L	[N]	Zaťažujúca sila ložiska
FTF	[Hz]	Frekvencia kľetky
G	[N/mm]	Matica tuhosti
H	[N·s/mm]	Matica tlmenia
k	[-]	Eliptický parameter
K	[N/mm]	Tuhosť kontaktu
K_{pv}	[mm]	Koeficient prechodovej rýchlosti
L	[mm]	Dĺžka roviny na spodnej časti dráhy
M	[kg]	Hmotnostná matica
n	[-]	Počet valivých elementov
O_g	[min ⁻¹]	Otáčky guličky okolo vlastnej osi
O_s	[min ⁻¹]	Otáčky guličky okolo osi ložiska
R	[N·s/mm]	Tlmenie kontaktu
Rr	[mm]	Zaoblenie dráhy
Rr_{6205}	[mm]	Zaoblenie dráhy ložiska 6205
Rr_{6203}	[mm]	Zaoblenie dráhy ložiska 6203
R_x	[mm]	Redukovaný polomer osi x
R_y	[mm]	Redukovaný polomer osi y
R'	[mm]	Redukovaný polomer
S_{pv}	[mm]	Statická prechodová rýchlosť
v_o	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť vonkajšej dráhy
v_I	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť vnútornej dráhy
v_R	[m·s ⁻¹]	Orbitálna rýchlosť guľôčky
V	[m·s ⁻¹]	Celková rýchlosť ložiska
V_c	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť spoja kontaktu
W	[N]	Sila na najviac zaťaženom elemente