

# Oponentní posudek dizertační práce

**Autorka práce:** Ing. Lukáš Bartoň

**Název práce:** Znalostní podpora pro návrh systému aktivního magnetického ložiska

**Studijní obor:** Stavba strojů a zařízení

**Školitel:** doc. Ing. Jaromír Horák, Ph.D.

Předložená dizertační práce se zabývá návrhem aktivního magnetického ložiska. V úvodu práce autor obecně popsal současný stav problematiky ložisek. Nejvíce pozornosti bylo věnováno magnetickým ložiskům, které jsou hlavní náplní dizertační práce. Problematika je rozdělena podle několika hledisek a vhodně doplněna odkazy na literaturu. Cíle, které si autor v této části naformuloval, jsou dostatečné a byly splněny v následujících kapitolách.

## Význam dizertační práce pro obor

V kapitole 2 autor popisuje jednotlivé části aktivního magnetického ložiska jako jsou snímače, řídicí jednotka a zesilovač. Část věnovaná zesilovači je dle mého názoru příliš konkrétní a bylo by vhodnější spíše popsat obecné principy a druhy používaných zesilovačů.

Kapitola 3, 4 a 5 se zabývá vlastní prací autora a rozpracovává konkrétní metody výpočtu rotoru a magnetického ložiska. Výpočet vychylovacích cívek umístěných na statoru magnetického ložiska je založen na teorii magnetických obvodů. Autor vhodně zavádí lokální magnetické obvody (LMO), které obecně poměrně složitý magnetický obvod rozdělí na několik jednoduchých nezávislých obvodů. Popsané zjednodušení je vhodně ověřeno pomocí numerického výpočtu v programu COMSOL Multiphysics. V závěru kapitoly jsou odvozeny vztahy pro návrh obecného  $n$ -pólového magnetického ložiska. Tento přístup při návrhu magnetických ložisek považuji za nový a velice výhodný pro použití v expertním systému.

Kapitola 6 s věnuje popisu magnetických vlastností feromagnetických materiálů. Obsahuje řadu nepřesností, které jsou způsobeny autorovo nepřilíš hlubokou znalostí problematiky elektromagnetického pole. Nutno poznamenat, že tato problematika nebyla hlavním tématem předložené dizertační práce. Z hlediska členění bych zmíněnou kapitolu doporučoval zařadit do kapitoly 7.

Kapitola 7 se zabývá výběrem vhodného materiálu pro konstrukci magnetického obvodu a budících cívek. Je zpracována pečlivě a závěry považuji za správné.

Kapitola 8 je věnována tvorbě expertního systému pro návrh magnetických ložisek. Autor zvolil pro svůj znalostní systém prostředí MS Office z důvodu rozšíření mezi uživateli. V dnešní době by bylo vhodné zvážit i použití některé z webových technologií, která by dostupnost vytvořeného systému ještě více rozšířila. Navržený expertní systém byl ověřen na příkladu komerčně dostupného magnetického ložiska. Výsledky určené systémem se shodují s údaji, které jsou uváděny výrobcem.

Cíle dizertační práce byly splněny. Autor samostatně navrhl a implementoval v prostředí MS Office výpočet magnetického ložiska pomocí teorie magnetických obvodů.

## Doporučení k dalšímu rozvoji systému

- Přesnější popis feromagnetických materiálů včetně nelineární závislosti a hysterézní křivky
- Výpočet síly působící na rotor motoru pomocí některé z numerických metod.

## Formální a jazyková úroveň

Práce je zpracována s minimem překlepů a chyb. Je rozdělena na 8 kapitol, které jsou dále logicky členěny do několika podkapitol. K přehlednosti práce by velmi přispělo zařazení seznamů použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek.

### Poznámky k práci

- Některé obrázky jsou popsány anglicky (1.07, 1.12, 2.02, 2.04, 2.06, 2.07, 2.08, 2.11, 6.01, 7.01). V česky psané dizertační práci to není příliš obvyklé.
  - Vztahy a rovnice v práci nejsou číslovány. Z toho důvodu není možné se v textu na tyto rovnice odkazovat což velice snižuje čitelnost celé práce. V technické literatuře to je značně neobvyklý jev.
  - Autor používá některé symboly v jednotlivých místech práce pro označení různých veličin.
  - Expertní systém v kapitole 8 by mohl být lépe popsán např. s využitím odkazů na použité vztahy
- 
- str. 13: magnetická susceptibilita není relativní veličinou
  - str. 14: pyrolitický => pyrolytický
  - str. 25: obrázek 2.03 - není patrný princip kapacitního snímače
  - str. 26: měřícím senzorem založeném na Hallovo principu nemůže být samotná cívka
  - str. 30: princip činnosti zesilovače je popsán velice nevhodně, konkrétní údaje zcela zastiňují základní princip
  - str. 44: plusový => plusovým
  - str. 48, 51, 56 Magnetická indukce vypočtená v programu COMSOL Multiphysics v železe dosahuje hodnoty 1,8 T. Magnetizační charakteristika této oceli je nelineární a v rozích magnetického obvodu bude docházet k saturaci. Výsledná síla bude menší než při uvažování konstantní hodnoty permeability materiálu. V závěrečné kapitole je uvedena povolená magnetická indukce 1,5 T.
  - str. 52, 54, 55: vztah pro výslednou sílu. Jaký je význam vektorového součinu v uvedeném vztahu?
  - kapitola 4: příklad analytického výpočtu několika druhů ložisek a následné zobecnění mi přijde nepřehledné. Ke zvýšení čitelnosti práce by bylo vhodné odvození uvést v příloze a v kapitole 4 uvést pouze výsledné vztahy s patřičnou diskuzí. V této kapitole mi rovněž chybí srovnání analytického a numerického řešení ačkoliv by jistě provedeno.
  - str. 69: nezvyklá volba symbolu  $f$  pro koeficient plnění. Tento symbol je v elektrotechnice vyhrazen pro frekvenci a může tedy dojít k záměně.
  - str. 71: termín „elektrická stabilita“ by si zasloužil bližší vysvětlení. Obrázek 10.06 se v práci nevyskytuje.
  - str. 73:  $B$  značí magnetickou indukci
  - str. 73: konvertuje => konverguje
  - str. 73: lisované nebo válcované plechy jsou obecně anizotropní materiály a permeabilita je tedy obecně tenzorová veličina.
  - str. 74: v elektrotechnice je zvykem zobrazovat nelineární charakteristiku jako závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole jako je uvedeno na obrázku 6.01. Způsob zadání této veličiny do programu COMSOL Multiphysics mi přijde zbytečně uvádět.
  - str. 76: pro výběr vhodného materiálu by bylo vhodné sledovat koercitivní sílu místo

remanentní indukce. Velikost této veličiny je podstatná pro výběr vhodného materiálu z hlediska hysterézních ztrát (magneticky měkké materiály). Uzká hysterézní křivka je sledována s ohledem na vodorovnou osu, na které se nachází právě koercitivní intenzita pole (viz. obr. 6.01  $H_c$ ).

### **Publikace autora**

Autor v průběhu svého studia publikoval 16 prací na tuzemských a mezinárodních konferencích. Je tedy zřejmé, že jádro dizertační práce bylo v dostatečné míře publikováno, přičemž celkový počet uvedených publikovaných prací odpovídá obvyklému požadovanému množství publikací doktoranda.

### **Vyjádření oponenta**

Ing. Lukáš Bartoň splnil stanovené cíle doktorské dizertační práce. Dizertant v rámci své práce vytvořil vlastní expertní systém, který ověřil na příkladu komerčně vyráběného ložiska. Předložená práce je v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. a splňuje požadavky na úroveň doktorských dizertačních prací. Doktorand prokázal schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce. Z výše uvedených důvodů doktorskou dizertační práci doporučuji k obhajobě.

V Plzni, dne 17. listopadu 2012



doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D.

## Oponentní posudek disertační práce

autora Ing. Lukáše Bartoně

### „Znalostní podpora pro návrh systému aktivního magnetického ložiska“

Aktivní magnetická ložiska (AML) jsou moderním konstrukčním elementem, který nachází stále častější uplatnění. Jedinou překážkou širšího použití AML je jejich dosud relativně vysoká cena ve srovnání s jinými způsoby uložení. Téma disertační práce je velmi aktuální, přestože v ČR byla aktivní magnetická ložiska aplikována dosud pouze ve výjimečných případech, a to s použitím ložisek dodaných ze zahraničí. Rozšíření znalostí v tomto oboru je proto velmi potřebné a může přispět k dalším perspektivním aplikacím.

#### a) Zhodnocení významu pro obor:

Disertační práce obsahuje značné množství informací, které jsou pro návrh AML potřebné. Autor se zabývá jak teoretickými záležitostmi magnetického pole, tak i praktickými aspekty návrhu AML, včetně pevnostního výpočtu exponovaných částí a výběru vhodných konstrukčních materiálů. Shromáždění tak velkého objemu informací představuje samozřejmě velký přínos pro rozvoj oboru.

#### b) Vyjádření k postupu řešeného problému, použitým metodám, ke splnění stanoveného cíle:

Autor nejprve hodnotí vlastnosti jiných typů uložení, včetně pasivních magnetických ložisek, a uvádí jejich přednosti a nedostatky ve srovnání s AML.

Další část disertační práce se zabývá popisem jednotlivých částí systému AML. Pozornost je věnována zejména snímačům polohy rotoru a řídicímu systému, jako nejdůležitějším částem systému, které rozhodují o spolehlivosti celého uložení. Jsou uvedeny a vzájemně porovnány snímače, které jsou v současné době k dispozici. Kromě popisu řídicích jednotek je provedena i analýza ztrát, které se u AML vyskytují

Výpočetní část disertace obsahuje jak pevnostní výpočet rotorových kroužků, tak stanovení magnetomotorické síly v ložisku. Je řešeno několik variant ložisek, až po obecný případ n-pólového ložiska. Metodou konečných prvků je vypočten průběh magnetického pole ve statoru a rotoru. Na základě vztahů uvedených v disertaci lze navrhnout správnou velikost AML a stanovit maximální proud, při němž dochází k nasycení materiálu magnetickým tokem.

V další části práce autor uvádí výčet současně používaných a některých perspektivních materiálů pro konstrukci AML.

Závěrečná část disertace je věnována popisu činnosti vlastního znalostního systému pro návrh AML. Korektnost návrhu AML na základě vytvořeného programu je ověřena na konkrétním případě ložiska firmy Mecos. V závěru autor také doporučuje, jakým směrem by se práce v daném oboru měla dále rozvíjet.

Celkově lze použitý postup řešení problému hodnotit jako systematický a logicky správný, s využitím dostupných informací z celého širokého oboru vědomostí. Všechny cíle disertační práce, stanovené v jejím úvodu, byly splněny.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a původního konkrétního přínosu

Hlavním přínosem disertační práce je shromáždění značného množství informací z různých oborů, které jsou pro konstrukci AML nezbytné. Původním přínosem disertanta je zpracování programu, který získané informace využívá pro návrh AML. Za pozitivní lze označit také jeho ověření na konkrétním případě ložiska. Přínosem vytvořeného programu je zejména možnost významného zkrácení času, potřebného pro návrh AML. Návrh rotoru a jeho uložení pro rychloběžné rotační stroje totiž není v žádném případě přímočarý. Jde spíše o jakýsi iterační proces, oscilující mezi návrhem rotoru a kontrolou jeho dynamiky, přičemž důležitá je zejména poloha ohybových kritických otáček a mez stability. Výsledkem tohoto procesu je konečný návrh stroje, vyhovující z hlediska funkce uložení i dynamiky rotoru. Zkrácení času potřebného pro návrh uložení tak přispívá k urychlení vývoje nových strojů.

d) Další vyjádření

Práce je členěna systematicky a logicky; je zpracována přehledně a její grafická úprava je na vysoké úrovni. Rovněž k jazykové úpravě disertace nelze mít zásadní připomínky. Jediná faktická chyba, kterou by bylo vhodné v práci opravit, se týká záměny statorových a rotorových plechů na str. 80. Hodnocení pozitivních vlastností AML lze při srovnání s existujícími praktickými zkušenostmi pokládat za poněkud příliš optimistické, což však s vlastním tématem disertace souvisí jen zcela okrajově.

e) Vyjádření k publikacím autora

V předložené práci uvádí disertant 12 odkazů, z nichž ve dvou je uveden jako hlavní autor. Přestože se některé z uvedených odkazů netýkají přímo tématu disertace, lze pokládat počet publikací za přiměřený.

f) Doporučení

Na základě dosažené úrovně disertace a jejích výsledků doporučuji disertační práci k obhajobě (dle zákona č. 111/1998 Sb. § 47).

V Praze 14.11.2012

Ing. Jiří Šimek, CSc.

