

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles

Ing. Lubomír Houfek

**ANALÝZA DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ ROTOROVÝCH
SOUSTAV S MAGNETICKÝMI SPOJKAMI**

**DYNAMIC ANALYSIS OF ROTORSYSTEMS BEHAVIOUR
WITH MAGNETIC DRIVES**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: Doc. Ing. Eduard Malenovský, DrSc.
Oponenti: Prof. Ing. Ján Kamenický, CSc.
Doc. Dr. Ing. Jan Dupal
Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Datum obhajoby: 18. 1. 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

magnetické pole, magnetická spojka, rotorová soustava, kmitání, experiment

KEYWORDS

magnetic field, magnetic drive, rotorsystems, vibrations, experiment

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

© Lubomír Houfek, 2002

ISBN 80-214-2084-7

ISSN 1213-4198

Obsah

1 Úvod	5
2 Stav řešené problematiky	5
2.1 Současný stav v oblasti dynamiky rotorových soustav	6
2.2 Současný stav v oblasti výpočtů magnetických polí	7
3 Cíl disertační práce	8
4 Zvolené metody zpracování	9
5 Hlavní výsledky práce	10
5.1 Použitá teorie	10
5.2 Výpočtové modelování	13
5.2.1 Vytvoření modelu magnetické spojky v systému MKP ANSYS	14
5.2.2 Výpočet magnetického pole	14
5.3 Testovací výpočty	15
5.3.1 Vliv hustoty diskretizace	15
5.3.2 Možnosti modelování ve 3D a porovnání s modelováním ve 2D	15
5.3.3 Vliv materiálu magnetů	16
5.4 Realizační výpočty	16
5.4.1 Vliv natočení	16
5.4.2 Vliv velikosti vzduchové mezery	16
5.4.3 Vliv stupně krytí	16
5.4.4 Vyšetřování charakteristik magnetické spojky	17
5.4.5 Rotorové soustavy s magnetickou spojkou	18
5.5 Experimentální modelování	20
5.5.1 Měření momentové charakteristiky	20
5.5.2 Měření vlivu teploty na magnetickou spojku	22
6 Závěr	22
Summary	24
Použitá literatura	25
Autorovy publikace	26
Životopis	27

1 ÚVOD

Při čerpání látek, které jsou např. toxické, radioaktivní nebo vzácné, kde i minimální ztráty jsou cenné, je nesmírně důležité utěsnění pracovního prostoru čerpadla. V minulosti se k tomu s úspěchem používaly mechanické ucpávky, které během svého vývoje dosáhly mnoha variant a staly se základním prvkem v tomto oboru. Postupem času však byl z praxe požadavek na ještě lepší utěsnění pracovního prostoru. Na přelomu 80. a 90. let došlo k zásadnímu převratu v této oblasti. Tento nový přístup využil nového konstrukčního prvku – magnetickou spojku.

Hlavní důvod pro použití magnetické spojky je v tom, že dokáže neprodyšně od sebe oddělit vnitřní pracovní prostor od vnějšího prostředí. K přenosu výkonu se používá magnetické pole. Toto pole má tu vlastnost, že dokáže přecházet i přes kovové přepážky. Této vlastnosti je využito při konstrukci magnetické spojky. Magnetická spojka se proto principiálně skládá ze tří hlavních dílů – vnitřní rotor s permanentními magnety, vnější rotor s permanentními magnety a oddělovací přepážka – hrnec.

V České republice se výrobou těchto spojek nezabývá žádná firma. Existují však firmy, které provádí montáž do svých zařízení. Firmy vyrábějící spojky většinou s nimi dodávají software pro návrh typu a velikosti spojky. Pro správný návrh je třeba (ve většině případů) znát typ čerpadla a elektromotoru, který dané čerpadlo pohání. Na základě těchto informací je pomocí softwaru vybrána spojka z katalogu, která by měla při dané bezpečnosti přenést kroutící moment. Firmy provádějící montáž jsou tak nuceny používat daný software jako „black box“. I když většina výrobců spojek tvrdí, že takto provedený návrh spojky je spolehlivý, přesto dochází k haváriím. Montážní firmy však nejsou schopny analyzovat důvody havárie. Důvodem je neznalost modelování magnetických spojek a rotorových soustav s magnetickými spojkami.

V předložené práci jsme se zaměřili na zjišťování možnosti výpočtového a experimentálního modelování magnetických spojek a na posouzení vlivu některých parametrů, které ovlivňují jejich dynamické chování.

2 STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Problematika magnetických spojek je zcela novým oborem v oblasti modelování rotorových soustav. V České republice není žádné pracoviště (alespoň pokud je autorovi známo), které by se tímto problémem zabývalo. Ve světě je známo jedno pracoviště – Univerzita v Darmstadtu ve Spolkové republice Německo, kde je skupina zabývající se elektromagnetickými vazebnými prvky v oblasti rotorových soustav. Řešená problematika je tedy nová, mezioborová a je třeba vycházet ze současného stavu v obou oborech – výpočty magnetických polí a dynamika rotorových soustav.

2.1 Současný stav v oblasti dynamiky rotorových soustav

Téma předložené práce je zaměřeno na kmitání mechanické soustavy s převažujícím torzním kmitáním. Kmitání příčné je možné za velmi speciálních předpokladů. Axiálnímu kmitání by mělo být zamezeno zcela. Přístup k řešení byl zvolen pomocí výpočtového modelování – výpočty vlastních čísel, ustálené kmitání a výpočtové simulace – které je v současné době vrcholem v modelování mechanických soustav. Pro takto postavenou problematiku je možno použít několik modelů, které se od sebe mohou lišit jak náročností, tak přístupem k jejich formulaci.

Nejjednodušším modelem rotoru je tzv. Lavalův (Jeffcottův) rotor. Jde o model kotouče uloženého uprostřed rotoru zatíženého vlastní tíhou a momentem. Model má dva stupně volnosti – posuv ve dvou na sebe kolmých osách. Model neobsahuje gyroskopické účinky. Je však jednoduchý a pro jednoduché analýzy, které nevyžadují vliv gyroskopických účinků, je dostačující.

Složitější modely rotorů, obsahující vliv gyroskopických účinků i vliv uložení, jsou většinou založené na odvození pohybové rovnice pro celý rotor. Modely mohou mít až čtyři stupně volnosti – posuvy ve dvou na sebe kolmých osách a natočení kolem těchto os. Modely pro torzní namáhání, případně pro axiální pohyb, jsou většinou odděleny od analýzy kmitání v příčném směru. Existují však případy (např. soustavy s čelními ozubenými koly se šikmým ozubením), kdy oddělení příčného kmitání od axiálního nelze provést. Tyto modely jsou velmi vhodné k testování např. při modelování nových vazebných elementů. Jejich výhodou je jednoduchost a snadná implementace do softwarové podoby a výpočtová nenáročnost.

S rozvojem počítačových podpor v mechanice došlo během 70. a 80. let k rozvoji nových výpočetních metod, které umožnily řešení složitějších struktur. Nejznámějšími a nejvíce rozšířenými se staly metoda přenosových matic a metoda konečných prvků, která je v současné době převažující v aplikační oblasti.

Metoda přenosových matic je založena na rozdělení kontinua na souvislé oblasti na kterých lze jednoduše napsat vazbu mezi dvěma krajními body oblasti ve formě přenosové matice. Tyto matice se potom skládají do výsledné matice přenosu. Ta potom slouží k dalšímu řešení dynamiky.

Principem metody konečných prvků je rozdělení kontinua na jednotlivé podoblasti – prvky. Prvek umožňuje modelovat až 6 stupňů volnosti na jednom uzlu – dva posuvy ve dvou na sebe kolmých směrech v příčném směru, rotace kolem těchto os, axiální posuv a torzní kmitání okolo osy rotace. Potom při vhodném dělení dostáváme modely s mnoha stupni volnosti. Modely obsahují kotouče, mohou být odstupňované, mohou mít nesymetrický průřez. Dají se modelovat i rotory koaxiální. Modely dále umožňují modelovat celé spektrum vazebných elementů a jevů.

Hlavním problémem současných analýz rotorových soustav je jejich velká časová náročnost. Tato náročnost má dvě základní příčiny:

- stále lepšími modely vazebných elementů, které dnes jsou až na výjimky nelineární.
- v případě modelování celé soustavy rotor – vazební elementy – stator pomocí metody konečných prvků, jdou počty stupňů volnosti celé soustavy řádově do statisíců až milionů.

Ke slovu se proto opět dostávají různé metody redukce modelů, nebo metody, které umožňují separovat řešení dynamiky vazebného elementu od vlastního řešení rotorové soustavy. Metody redukce se dělí následovně:

1. Redukce v geometrické oblasti
 - Guyanova redukce
 - Redukce stavového modelu
2. Redukce ve frekvenční oblasti
 - Levyho metoda
 - Metoda dynamických poddajností
3. Redukce v modální oblasti
 - Modální metoda

Mezi velice moderní a progresivní metody v současnosti patří metoda dynamických poddajností. Metoda umožňuje řešit modální vlastnosti rotorových soustav (vlastní frekvence a tvary) a vychází z dekompozice celé soustavy na jednotlivé elementy – rotor, vazební elementy (ložiska) a stator. Jednotlivé elementy je možno analyzovat samostatně a pomocí této metody se opět sestaví do jednoho celku, který dále analyzujeme. Hlavní předností metody je, že vlastní analýza podsoustav je naprosto nezávislá na volbě metody analýzy a softwaru, který k tomu použijeme. Dokonce je možné analyzovat i soustavy, od nichž známe modální vlastnosti jedné nebo více částí zjištěné experimentálně.

Modální metoda vychází z podobného principu jako metoda dynamických poddajností. Také je potřeba nejprve analyzovat jednotlivé části – rotor, vazební elementy, stator – samostatně. Rozdíl je v další analýze. Zatímco u modální metody je výsledkem syntézy pohybová rovnice, u metody dynamických poddajností se vypočítává dynamická poddajnost soustavy.

2.2 Současný stav v oblasti výpočtů magnetických polí

Vývoj názorů a představ o elektromagnetickém poli je typickým příkladem dialektiky v rozvoji lidského poznání. Ještě před 150 lety se obecně přijímala představa, že elektrické, magnetické i gravitační síly působí mezi tělesy na dálku v absolutním prostoru, který je jednou provždy daným a nedotknutelným jevištěm všech fyzikálních jevů. Víra v absolutní prostor a čas ovládala fyziku až do počátku našeho století. Novější věda však až dosud vyvrátila všechno, co se dříve jevilo „absolutním, pro vždy daným a neovlivnitelným“, stejně jako odhalila vnitřní strukturu toho, co se jevilo jako „dále nedělitelným“.

O první průlom do dřívějších představ o působení mezi elektrickými náboji na dálku má zásluhu Faraday, který vytvořil dodnes používanou představu

o elektrických a magnetických silových čarách a trubicích. Učení o elektromagnetickém poli po něm matematicky a experimentálně rozvinuli Maxwell, Hertz, Poynting, Lorentz a jiní. Další skok ve vývoji poznání v této oblasti přinesla Einsteinova teorie relativity (1905), opustila definitivně představu nevážitelného „éteru“, který se měl prostírat jako nositel elektromagnetických dějů po absolutním prostoru. Touto teorií se uzavřel soubor znalostí tzv. klasické fyziky.

Poznání postupuje po jistých etapách, z nichž každá znamená změnu kvantity v kvalitu. I když to zní paradoxně, představuje každý vývojový skok současně zjednodušení modelu přírody, který člověk svým intelektem vytváří. Na tom nic nemění skutečnost, že použité matematické pojmy a operace jsou v každé nové teorii stále složitější, a že se každý nový model přírody skládá z objektů, které se již vymykají našim navyklým představám.

Za posledních 30 let došlo k významným změnám ve způsobech hledání řešení fyzikálních polí (elektrické, magnetické, tepelné, gravitační pole atd.). Je to způsobeno bouřlivým rozvojem výpočetní techniky, takže problémy, které byly původně řešitelné pouze analyticky, popřípadě experimentálně, jsou řešeny pomocí různých numerických metod a to za zlomek času a nákladů, původně potřebných pro analytické, nebo experimentální řešení.

Mezi tyto často používané analytické metody patřily:

- Metoda konformního zobrazení
- Metoda separace proměnných
- Metoda integrální transformace

V dnešní době jsou, jak již bylo uvedeno, upřednostňovány numerické metody řešení. Mezi tyto metody patří například Metoda konečných diferencí, Metoda konečných prvků, Metoda hraničních prvků, Metoda konečných objemů atd. Numerické metody řešení polí mají ještě jednu nezanedbatelnou výhodu, a to, že umožňují řešit problémy, pro které by analytické řešení bylo velice obtížné, nebo toto řešení vůbec neznáme.

3 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Magnetické spojky se začínají ve světě i v České republice používat ve stále větší míře v čerpadlové technice, kde konkurují mechanickým ucpávkám, které v mnohých parametrech značně předčí. I když se jedná o aplikace, kde jakákoliv drobná závada může vést ke značným finančním ztrátám nebo k možnému poškození životního prostředí. Při návrhu těchto zařízení jsou konstruktéři odkázáni na používání softwaru dodávaného výrobcí spojek.

Formulace problému, který bude řešen v předložené disertační práci, vyplývá ze současného stavu v oblasti modelování magnetických spojek a je formulován následovně:

Provést komplexní analýzu dynamického chování rotorové soustavy s magnetickou spojkou a vyšetřit závislosti jednotlivých návrhových parametrů magnetické spojky na chování rotorové soustavy s magnetickou spojkou.

Cíle, které povedou k vyřešení problému, se dají definovat v následujících bodech:

- Analyzovat současný stav v oblasti magnetických spojek a jejich implementace v oblasti rotorových soustav.
- Analyzovat možnosti výpočetního modelování magnetických spojek a rotorových soustav s magnetickými spojkami.
- Analyzovat vliv jednotlivých návrhových parametrů na dynamické vlastnosti magnetických spojek a rotorových soustav s magnetickými spojkami.
- Experimentálně ověřit správnost výpočetního modelování.

4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Pro vyřešení problému formulovaného v kapitole 3 bylo zvoleno výpočtové modelování v kombinaci s experimentálním modelováním.

Výpočtové modelování bylo rozděleno do dvou částí. V první etapě bylo modelováno magnetické pole spojky a ve druhé části chování rotorových soustav s magnetickou spojkou. Hlavní metodou pro výpočty v obou částech byla metoda konečných prvků.

Pro výpočty rozložení magnetického pole spojky byl použit MKP systém ANSYS. Vstupem do ANSYSu jsou geometrie magnetické spojky a materiálové charakteristiky materiálů, které jsou použity na spojce. V našem případě to byly **B-H** charakteristiky permanentních magnetů a železa. Výstupem z ANSYSu je rozložení magnetické indukce **B** ve spojce, z níž je možno vypočítat velikost sil působících na vnější rotor magnetické spojky a z něj moment, který generuje magnetické pole.

Pro výpočtové modelování rotorových soustav byl sestaven speciální software na základě MKP, který modeluje torzní chování rotorové soustavy. Vstupem do tohoto softwaru je geometrie rotorové soustavy a charakteristika magnetické spojky – závislost momentu magnetického pole na relativním natočení. Tato závislost je získána pomocí ANSYSu z výpočtů rozložení magnetické indukce.

Metodou, které bylo použito při výpočtech rotorových soustav, je výpočtová simulace. Tato metoda byla zvolena proto, že jako jediná z používaných metod umožňuje úplné řešení bez jakýchkoliv předpokladů na řešení. Výsledkem řešení je potom reálná odezva soustavy na daný typ buzení. Nevýhodou je nutnost udělat mnoho výtčů pro získání obecné závislosti.

V experimentální části práce byla hlavní metodou pro úpravu signálů získaných z měření použita metoda konvolučního filtrování pro odstranění aditivního šumu. Naměřená data byla následně podrobena prokládáním křivkami pomocí metody nejmenších čtverců.

5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Výpočtové modelování je v této práci chápáno jako abstraktní (teoretické) modelování, jehož modelovým objektem je vhodná množina teorií, z nichž je vybrána ta, která je efektivní pro řešení daného problému.

5.1 Použitá teorie

K výpočtu magnetického pole spojky lze použít klasické Maxwellovy teorie elektromagnetického pole. Tato teorie je zcela obecná a lze ji použít na soustavy stacionární i nestacionární. Tato teorie vychází ze čtyř obecně platných fyzikálních zákonů, které jsou formulovány v následující podobě:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho, & \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Rovnice uvedené v prvním řádku se někdy nazývají první sérií Maxwellových rovnic a udávají vzájemný vztah mezi vektory elektromagnetického pole, objemovou hustotou volných nábojů ρ a hustotou volných proudů \mathbf{J} . Rovnice v druhém řádku se nazývají druhá série Maxwellových rovnic a vyznačují obecně platné vlastnosti vektoru intenzity elektrického pole \mathbf{E} a magnetické indukce \mathbf{B} . Pro vektory elektrické indukce \mathbf{D} a intenzity magnetického pole \mathbf{H} podobné vztahy nelze odvodit. Takto formulovaná soustava Maxwellových rovnic je omezena pouze na případ elektromagnetického pole nacházejícího se v klidu vůči pozorovací soustavě souřadnic. Indukovaná elektromotorická napětí, případně další jevy vznikající v pohybujících se vodičích, je třeba popsat pomocí dodatečných vnějších sil.

Maxwellovy rovnice (1) představují soustavu parciálních diferenciálních rovnic prvního řádu. Takové rovnice mají nekonečně mnoho různých řešení a k určení jednoznačného je nutno doplnit okrajové podmínky. Čtyři neznámé vektorové funkce \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{H} představují dvanáct neznámých funkcí skalárních a počet Maxwellových rovnic je k jejich určení nedostatečný. V látkovém prostředí však existují materiálové vztahy – závislosti \mathbf{B} na \mathbf{H} resp. \mathbf{D} na \mathbf{E} . V určité aproximaci mohou být vyjádřeny funkčními závislostmi $\mathbf{D}=\mathbf{D}(\mathbf{E})$ a $\mathbf{H}=\mathbf{H}(\mathbf{B})$. Pro mnoho látek můžeme dokonce předpokládat platnost lineárních vztahů

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2)$$

a k určení vektorů \mathbf{D} a \mathbf{H} stačí znát permitivitu ε a permeabilitu μ prostředí. V neisotropních lineárních prostředích, kde vektory \mathbf{E} a \mathbf{D} , resp. \mathbf{B} a \mathbf{H} nemusí mít též směr, je třeba znát složky tenzoru permitivity resp. permeability. Doplníme-li soustavu Maxwellových rovnic konstitutivními vztahy, zjednoduší se úloha na hledání vektorů $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ a $\mathbf{B}(\mathbf{r},t)$ - tedy šesti skalárních funkcí.

V případě magnetických spojek je elektromagnetické pole jako celek stacionární a soustava Maxwellových rovnic se redukuje na soustavu rovnic popisující pouze magnetické stacionární pole

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = 0 \quad \operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

Tuto soustavu musíme ještě doplnit konstitutivními vztahy - závislostmi \mathbf{B} - \mathbf{H} pro magnety a pro kovový materiál spojky. U vzduchové mezery předpokládáme $\mu=1$. Tyto materiálové vztahy se musí získat buď od výrobce spojky, nebo z materiálových listů.

K výpočtu rozložení vektorů \mathbf{B} a \mathbf{H} magnetického pole je používán MKP systém ANSYS. Výpočet rozložení elektromagnetického pole v dvourozměrném modelu je v programu proveden pomocí vektorového magnetického potenciálu. Z tohoto magnetického vektorového potenciálu je podle rovnice (4) vypočtena hodnota vektoru magnetické indukce

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} N_A \mathbf{A}_e, \quad (4)$$

kde N_A je tvarová funkce pro příslušný element

\mathbf{A}_e uzlová hodnota vektorového magnetického potenciálu na daném prvku

V rotorových soustavách magnetickou spojku modelujeme jako přídavné zatížení, nebo (pokud je to možné) jako přídavnou tuhost a tlumení. Je proto nutné určit závislost zatížení na relativních posuvech a natočeních vnitřního a vnějšího rotoru spojky. Toto je možné provádět tak, že propočítáme mnoho rozložení magnetického pole pro různé polohy rotorů spojky. Pro každý případ pak můžeme vypočítat elektromagnetické síly, které generuje magnetické pole spojky. Výpočet sil se provádí na ploše vzduchové vrstvy, která obklopuje feromagnetickou oblast. Výsledky jsou vypočteny numerickým řešením plošného integrálu

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu_0} \iint_S \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} dS \quad (5)$$

$$T_{11} = B_x^2 - \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \quad (6)$$

$$T_{12} = B_x B_y \quad (7)$$

$$T_{21} = B_x B_y \quad (8)$$

$$T_{22} = B_y^2 - \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \quad (9)$$

Z takto určených sil můžeme vypočítat příslušnou složku zatížení – moment \mathbf{M} , síly ve směru y a z – \mathbf{F}_y , \mathbf{F}_z .

Toto zatížení lze modelovat jednotným matematickým modelem, který můžeme napsat ve tvaru

$$\mathbf{f}_i = -\mathbf{K}_i \mathbf{q}_i \quad (10)$$

kde \mathbf{f}_i je vektor přídavného zatížení

\mathbf{K}_i je matice tuhosti

\mathbf{q}_i je vektor výchylek

Matice \mathbf{K}_i lze napsat jednotně s následující strukturou:

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{ij} \\ \mathbf{K}_{ji} & \mathbf{K}_{jj} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Tvar jednotlivých matic \mathbf{f}_i , \mathbf{K}_i , \mathbf{q}_i se liší podle použitého modelu.

model se dvěma stupni volnosti

Tento model je charakterizován jedním parametrem, kterým je tuhost v torzním směru k_φ . Matice \mathbf{f}_i , \mathbf{K}_i , a \mathbf{q}_i mají tvar:

$$\mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} M k_i \\ M k_{i+1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{q}_i = \begin{bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_{i+1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} k_\varphi & -k_\varphi \\ -k_\varphi & k_\varphi \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$k_\varphi = \frac{\partial M}{\partial(\varphi_i - \varphi_{i+1})}$$

model s osmi stupni volnosti

Model je charakterizován čtyřmi parametry – k_{yy} , k_{zz} , k_{yz} , k_{zy} . Matice \mathbf{f}_i , \mathbf{K}_i , a \mathbf{q}_i mají tvar:

$$\mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} F y_i \\ 0 \\ F z_i \\ 0 \\ F y_{i+1} \\ 0 \\ F z_{i+1} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{q}_i = \begin{bmatrix} v_i \\ \psi_i \\ w_i \\ v_i \\ v_{i+1} \\ \psi_{i+1} \\ w_{i+1} \\ v_{i+1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_{ii} = \begin{bmatrix} k_{yy} & 0 & k_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{zy} & 0 & k_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$k_{yy} = \frac{\partial F y}{\partial(v_i - v_{i+1})}; \quad k_{zz} = \frac{\partial F z}{\partial(w_i - w_{i+1})}$$

$$k_{yz} = \frac{\partial Fy}{\partial(w_i - w_{i+1})}; \quad k_{zy} = \frac{\partial Fz}{\partial(v_i - v_{i+1})}$$

model s deseti stupni volnosti

Model je charakterizován devíti parametry – k_{yy} , k_{zz} , k_{yz} , k_{zy} , k_φ , $k_{y\varphi}$, $k_{z\varphi}$, $k_{\varphi y}$, $k_{\varphi z}$. Matice \mathbf{f}_i , \mathbf{K}_i , a \mathbf{q}_i mají tvar:

$$\mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} Fy_i \\ 0 \\ Fz_i \\ 0 \\ Mk_i \\ Fy_{i+1} \\ 0 \\ Fz_{i+1} \\ 0 \\ Mk_{i+1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{q}_i = \begin{bmatrix} v_i \\ \psi_i \\ w_i \\ v_i \\ \varphi_i \\ v_{i+1} \\ \psi_{i+1} \\ w_{i+1} \\ v_{i+1} \\ \varphi_{i+1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_{ii} = \begin{bmatrix} k_{yy} & 0 & k_{yz} & 0 & k_{y\varphi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{zy} & 0 & k_{zz} & 0 & k_{z\varphi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{\varphi y} & 0 & k_{\varphi z} & 0 & k_\varphi \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$k_{yy} = \frac{\partial Fy}{\partial(v_i - v_{i+1})}; \quad k_{zz} = \frac{\partial Fz}{\partial(w_i - w_{i+1})}; \quad k_\varphi = \frac{\partial M}{\partial(\varphi_i - \varphi_{i+1})}$$

$$k_{yz} = \frac{\partial Fy}{\partial(w_i - w_{i+1})}; \quad k_{zy} = \frac{\partial Fz}{\partial(v_i - v_{i+1})}; \quad k_{y\varphi} = \frac{\partial Fy}{\partial(\varphi_i - \varphi_{i+1})}$$

$$k_{z\varphi} = \frac{\partial Fz}{\partial(\varphi_i - \varphi_{i+1})}; \quad k_{\varphi y} = \frac{\partial M}{\partial(v_i - v_{i+1})}; \quad k_{\varphi z} = \frac{\partial M}{\partial(w_i - w_{i+1})}$$

5.2 Výpočtové modelování

Výpočty byly zaměřeny na obě zkoumané problematiky – výpočet magnetického pole a výpočet dynamických vlastností rotorových soustav. Zpočátku jsme se zaměřili hlavně na vytvoření metodiky výpočtu. Výpočet obsahuje následující kroky:

1. Vytvoření konečnoprvkového modelu magnetické spojky v systému MKP ANSYS
2. Výpočet magnetického pole – rozložení magnetické indukce \mathbf{B}
3. Výpočet sil a momentů magnetického pole
4. Získání příslušné charakteristiky magnetického pole spojky z dat z bodu 3
5. Vytvoření konečnoprvkového modelu rotoru
6. Zavedení vazby mezi rotory pomocí charakteristik magnetické spojky

5.2.1 Vytvoření modelu magnetické spojky v systému MKP ANSYS

Geometrie magnetické spojky je poměrně jednoduchá. Pro analýzu magnetického pole jsme do výpočtu nezahrnovali vnitřní ložiskovou vestavbu. Magnetickou spojku modelujeme jako 2D kontinuum. Důvodem tohoto zjednodušení je velmi dobrá shoda výsledků 2D modelu a 3D modelu. 2D model je však časově mnohem méně časově a hardwarově náročný.

K diskretizaci soustavy v systému MKP ANSYS se používají magnetické prvky PLANE 53. Tyto prvky musí mít pravidelnou strukturu, nelze provádět lokální zjemňování sítě konečných prvků, což negativně ovlivňuje možnosti modelování. Geometrie modelu tak musí být relativně jednoduchá. Největší nároky na kvalitu prvků jsou kladeny ve vzduchové mezeře, na níž se provádí největší množství výpočtů. Prvky v této oblasti musí být pravidelné, poměr stran se musí blížit 1:1. Zhoršováním tohoto poměru (tvoření obdélníků) má za následek zhoršení konvergence výpočtu a snižuje se přesnost výpočtu.

Z uvedeného vyplývá, že nároky na vytvoření konečno-prvkové sítě jsou velké a mají limitující vlastnosti převážně v bodu 3 výpočtového algoritmu, kdy nelze otáčet vnitřní rotor o jakýkoliv úhel, ale je třeba dopředu si rozvrhnout výpočtové kroky a jim přizpůsobit velikost prvků. Obecně platí, že čím více kroků, tím menší chyba, ale i menší prvky a větší hustota diskretizace a delší výpočetní časy.

Z důvodu optimalizace výpočtového modelu jsme provedli několik testovacích úloh, na nichž jsme zjišťovali vliv některých návrhových parametrů na kvalitu výsledků.

5.2.2 Výpočet magnetického pole

K provedení výpočtu je potřeba zadat magnetické vlastnosti materiálů, které jsou ve spojnici zastoupeny. Jedná se o materiál permanentních magnetů, ocelové součásti spojky, ale je také třeba charakterizovat i vzduchovou mezeru a okolí spojky, které se musí modelovat také. Obecně jsou všechny charakteristiky, reprezentované $\mathbf{B} - \mathbf{H}$ křivkami (závislostmi magnetické indukce na intenzitě magnetického pole), nelineární. Pro první přiblížení se však mohou linearizovat v pracovním bodě jednou konstantou - μ - permeabilitou daného prostředí. Tato náhrada je možná u vzduchu, kde je tato konstanta nabývá hodnoty 1. Obdobně lze nahradit charakteristiku i u nemagnetických materiálů, které se chovají podobně jako vzduch. Z konstrukčních materiálů se jedná o nerezovou ocel. U ostatních ocelových součástí je tato náhrada možná, ale není již plně adekvátní. Naprosto nevhodná je však u permanentních magnetů. K této „linearizaci“ se přistupuje především proto, že získat úplné charakteristiky daných materiálů je příliš náročné.

Pro výpočet pole je třeba zadat také okrajové podmínky. Tyto podmínky definují chování magnetického pole na okraji sledovaného prostoru, kde je předepsána nulová hodnota magnetického potenciálu. Z tohoto důvodu je kolem magnetické spojky uvažováno vzduchové pole.

Pomocí vypočítané hodnoty magnetického potenciálu je potom podle vztahu (4) vypočítaná magnetická indukce \mathbf{B} a z ní podle vztahu (5) jsou vypočítány magnetické síly působící na vnitřní rotor spojky. Rozložením jednotlivých složek do směrů y a z dostaneme příslušné složky F_y a F_z a moment \mathbf{M} .

5.3 Testovací výpočty

Před vlastním výpočtovým modelováním byly realizovány testovací výpočty, které slouží ke snížení časové náročnosti výpočtu při zaručení věrohodnosti výsledků. Hlavní dva parametry ovlivňující časovou náročnost jsou hustota diskretizace a dimenze úlohy.

5.3.1 Vliv hustoty diskretizace

Hustota diskretizace výrazně ovlivňuje možnosti modelování natočení rotoru a statoru. S rostoucí hustotou diskretizace je možné realizovat větší počet kroků natočení, přičemž platí, že je svázán počet prvků na vzduchové mezeře v radiálním a tangenciálním směru (z důvodů zachování poměru 1:1). Měnili jsme počet prvků v tangenciálním směru. Počet prvků po obvodu nutných k diskretizaci oblouku od poloviny jednoho magnetu do poloviny vedlejšího magnetu mezi jsme nazvali jemnost a je to $\frac{1}{2}$ počtu prvků, které byly použity na diskretizaci vzduchové mezery. Byly realizovány výpočty pro jemnost $j = 2, 8$ a 16 , tj. $4, 16$ a 32 prvky na oblouk. Analýza prokázala, že pro jemnost $j = 2$ jsou výsledky zcela nedostačující, naopak $j = 16$ již nedává lepší výsledky než $j = 8$. Je tedy optimální provádět analýzu s 16 prvky po mezeře a tomu odpovídajícímu počtu pootočení.

5.3.2 Možnosti modelování ve 3D a porovnání s modelováním ve 2D

Hlavním problémem při výpočtovém modelování magnetických spojek ve 3D je velká časová náročnost. Tato náročnost vzniká z důvodu nutnosti zachovat pravidelnou síť elementů. Při dodržení této podmínky narůstá počet elementů řádově oproti modelu, který jsme používali ve 2D. Zjišťovali jsme, zda výsledky dosažené pomocí modelu ve 2D a ve 3D vykazují nějaké kvantitativní a kvalitativní rozdíly.

V systému MKP ANSYS jsme vytvořili model, jež obsahoval 22 696 magnetických prvků SOLID 117 a propočítávali jsme momentovou charakteristiku magnetické spojky. Výpočtem se ukázalo, že rozdíly ve výsledcích mezi 2D modelem a 3D modelem jsou zanedbatelné.

Z výsledků výpočtového modelování vyplývá, že pro některé typy úloh lze plně nahradit 3D model modelem 2D bez ztráty přesnosti. Existují však ale i případy (např. nesouosost rotorů), kdy nelze toto zjednodušení použít.

5.3.3 Vliv materiálu magnetů

Jak bylo uvedeno výše, je poměrně složité získat konkrétní **B – H** charakteristiky magnetů. Konkrétní složení materiálů magnetů je většinou považováno za firemní tajemství. Zkoumali jsme vliv **B-H** charakteristiky na momentovou charakteristiku spojky. Pro výpočty jsme použili reálnou charakteristiku, dále jsme tuto charakteristiku podělili na polovinu a zvětšili dvakrát. Pro tyto tři materiály jsme vypočítali moment generovaný magnetickým polem pro různá vzájemná pootočení rotoru vůči statoru spojky. Analýza prokázala, že materiál magnetů nemá vliv na vlastní tvar charakteristiky, ale pouze na velikost maximálního momentu.

5.4 Realizační výpočty

Pro výpočet dynamických vlastností rotorových soustav s magnetickou spojkou je třeba určit její charakteristiku, kterou získáme regresní analýzou hodnot vypočtených v systému ANSYS.

5.4.1 Vliv natočení

Prvním výpočtem magnetického pole spojky bylo zjištěno, že průběh magnetických sil a momentů je periodický s periodou rovnou úhlu vzdálenosti dvou sousedních magnetů. Abychom získali celou charakteristiku na této periodě musíme, provádět výpočty pro různé vzájemné polohy vnitřního a vnějšího rotoru. V důsledku nutnosti zachování kvality sítě nelze natáčet o libovolný úhel, ale musíme natáčet o předem stanovený počet prvků. Tomu je třeba věnovat pozornost již při tvorbě sítě a volit velikost prvků tak, abychom mohli výpočet provádět v dostatečném množství bodů. Výsledek analýzy je na obrázku 1.

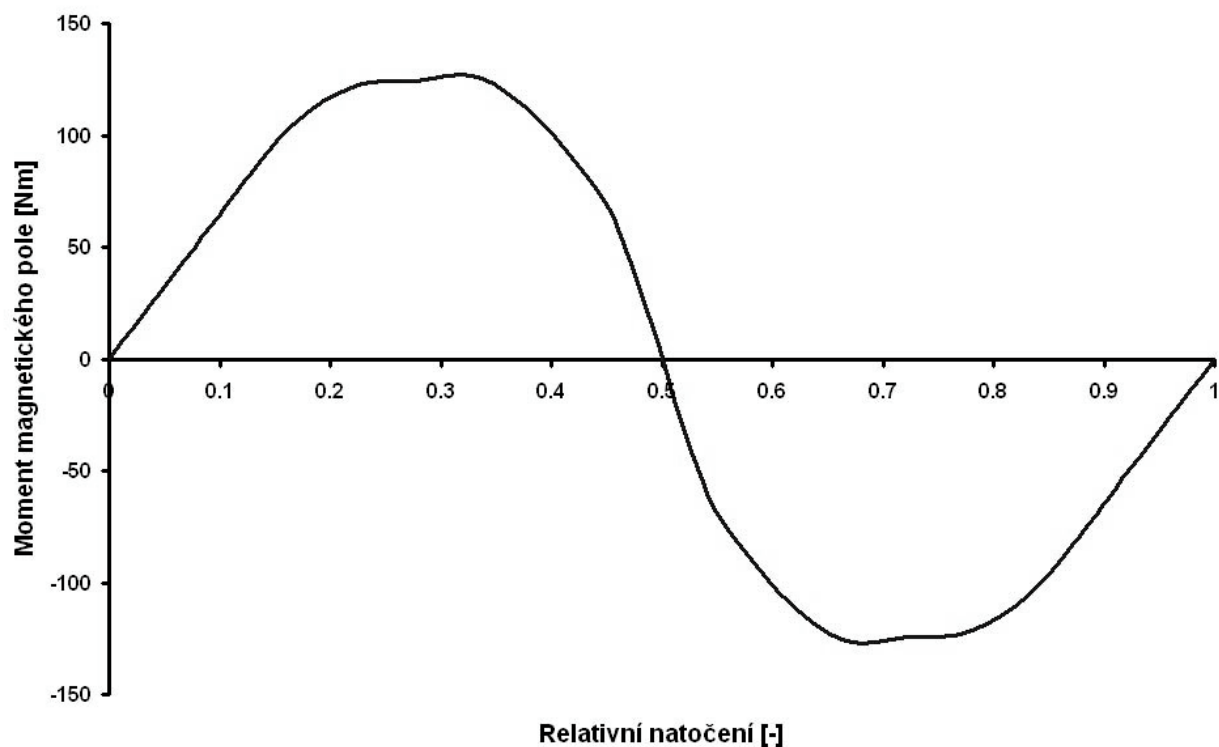
5.4.2 Vliv velikosti vzduchové mezery

Prováděli jsme analýzu vlivu velikosti vzduchové mezery na velikosti maximální hodnoty momentu magnetického pole. Při této analýze se potvrdilo očekávání, že se zvyšující se velikostí vzduchové mezery, se snižuje velikost magnetických sil a tím i magnetických momentů.

5.4.3 Vliv stupně krytí

V souladu s článkem [13], jsme analyzovali vliv stupně krytí na průběh momentů magnetického pole, definovaný vztahem:

$$sk = \frac{\text{plocha spojky krytá magnety}}{\text{celková plocha spojky}}, \quad (15)$$



Obr. 1. Vliv natočení

který udává poměr pokrytí rotorů magnety a je jednou ze základních veličin charakterizující magnetickou spojku. Stupeň krytí byl měněn od 0,1 do 0,9 s krokem 0,1. Analýza prokázala, že stupeň krytí má výrazný vliv na tvar charakteristiky a také ovlivňuje její maximální velikost. Přínosem je zjištění, že se změnou stupně krytí se posunuje maximální hodnota magnetického momentu. Zlomová je hodnota $sk = 0,5$. Pro hodnoty menší se maximální hodnota posunuje k vyšším relativním natočením, pro hodnoty větší naopak klesá k nižším relativním natočením - obr. 7. Uvedený posun maxima ovlivňuje tuhost spojky.

Z analýzy také vyplývá, že na stupni krytí závisí velikost maximálního přenášeného momentu. Neplatí však, že čím vyšší hodnota stupně krytí, tím větší maximální přenášený moment. Maximální kroučící moment je pro hodnoty okolo $sk = 0,8$.

5.4.4 Vyšetřování charakteristik magnetické spojky

S použitím výše uvedených výsledků jsme přistoupili ke komplexnímu výpočtu dynamických charakteristik konkrétní spojky. Vypočítávali jsme závislosti magnetické síly ve směru posunutí, magnetické síly kolmé na směr posunutí a magnetického momentu v závislosti na relativním posunutí a relativním natočení. Modelová spojka měla stupeň krytí 0.85.

Výpočet probíhal tak, že jsme vždy posunuli rotor spojky vůči statoru spojky, čímž jsme realizovali relativní natočení. Následně jsme pootáčeli stator vůči rotoru, abychom dostali relativní natočení. V každém kroku výpočtu jsme zjišťovali síly

působící na rotor spojky. Rozkladem těchto sil do směru posuvu, směru kolmého na posuv a směru tečného k povrchu rotoru spojky jsme získali jednotlivé složky zatížení. Tyto výsledky je již možno zahrnout do dalších výpočtů rotorových soustav.

5.4.5 Rotorové soustavy s magnetickou spojkou

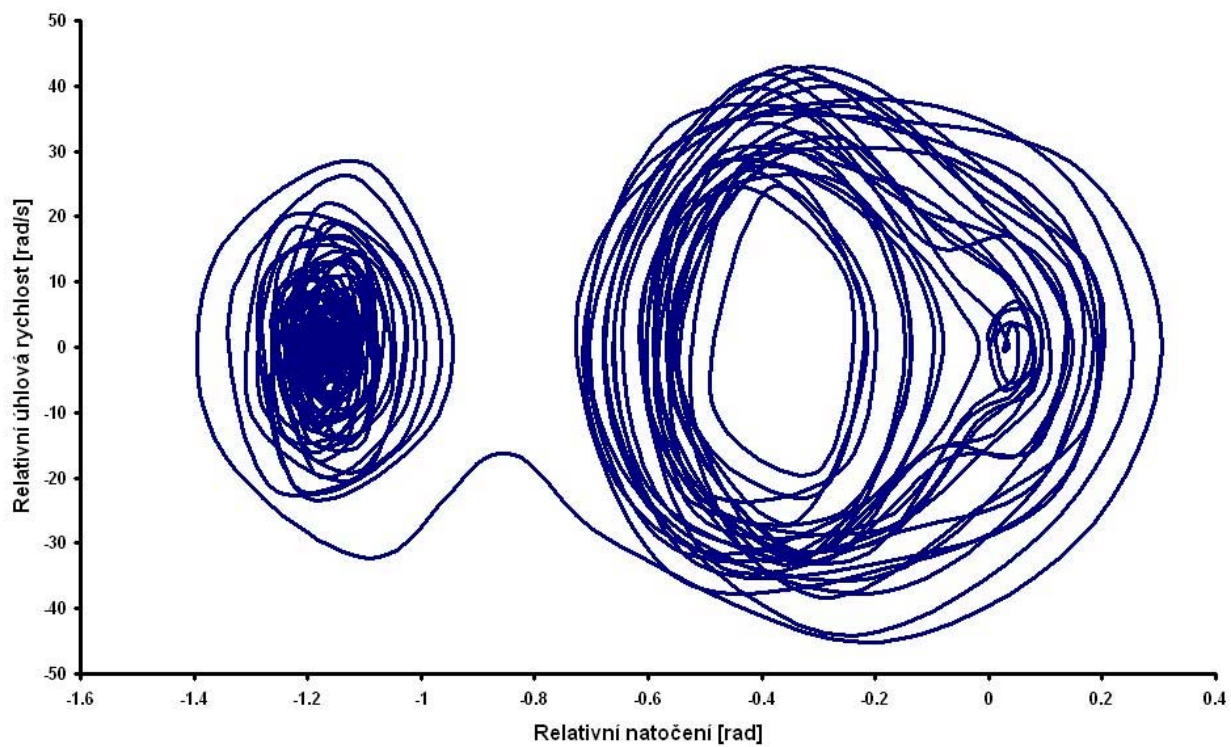
Výsledků uvedených v kapitole 5.4.4 je již možno použít pro další řešení dynamiky rotorových soustav. Chování rotorové soustavy jsme zkoumali na modelové soustavě, která měla modelovat čerpadlo spojené magnetickou spojkou s elektromotorem. Soustava byla diskretizovaná pomocí MKP, magnetická spojka byla zahrnuta, jak bylo uvedeno v kap. 5.1. Oba rotory byly modelovány pomocí rotorových prvků, disky diskretními diskovými prvky, ložiska jako lineární pružně – viskózní podpory. Rotorových prvků bylo 9 a měly 0,1 m průměr, délku 0,2 m. Disky charakterizovaly momenty setrvačnosti. Průměrový byl u obou kotoučů 0,005 kgm², osový byl 0,01 kgm². Spojka byla dlouhá 0,2 m, stupeň krytí byl 0,85.

Na této soustavě byly prováděny výpočtové simulace. První sada simulací byla zaměřena na zjišťování možnosti linearizace modelu. Byly vytvořeny dva modely magnetické spojky – lineární, kdy byla použita pouze lineární část charakteristiky, a nelineární, kdy jsme použili charakteristiku celou. Výsledek simulace prokázal, že použití lineární charakteristiky je možné jen ve speciálním případě, kdy bude malé relativní natočení mezi rotory. V opačném případě je model zcela chybný a nelze jej použít. Lineární model také neumožňuje modelovat mnohé zajímavé jevy, jako je přeskokování magnetů apod. Příklad chování nelineární rotorové soustavy s magnetickou spojkou je na obrázku 2, kde je ukázáno vytváření přeskoků magnetů a následné ustálení.

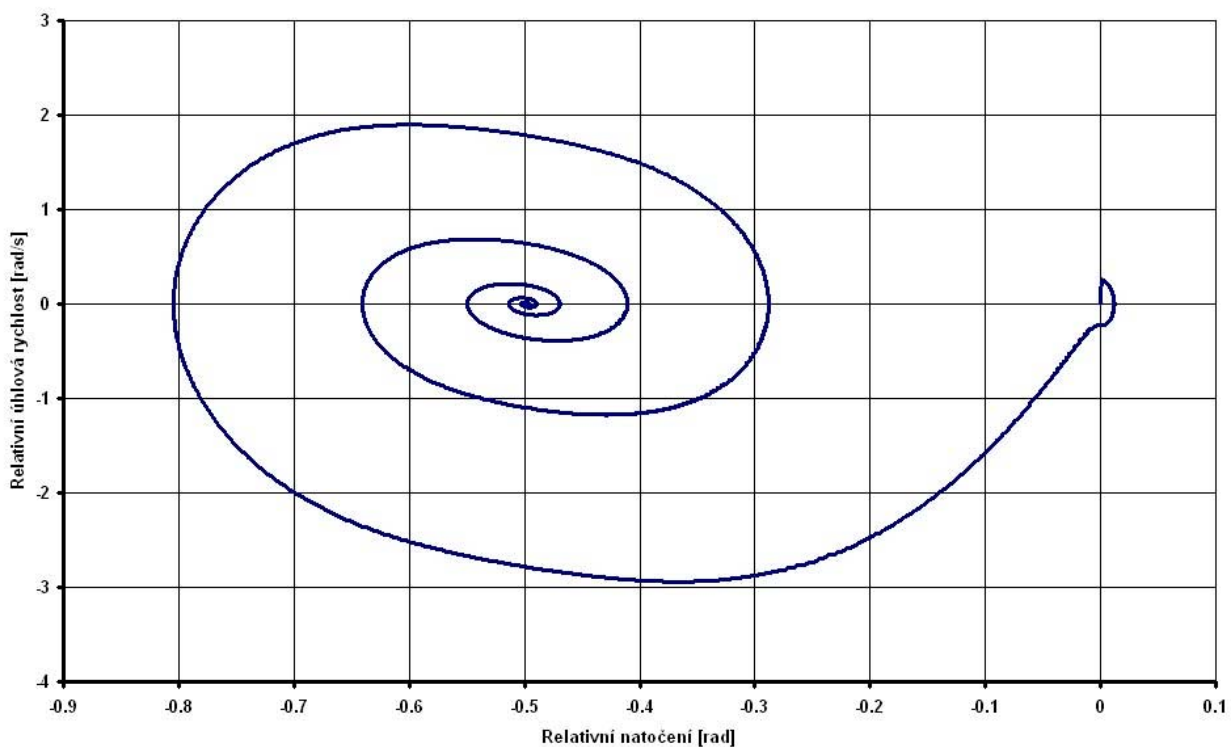
Druhou analýzou, která byla provedena, bylo zjišťování vlivu některého z návrhových parametrů na chování celé rotorové soustavy. Z možných návrhových parametrů, které byly analyzovány, byl vybrán stupeň krytí, protože s měnícím se stupněm krytí se mění jak tvar tak i maximální přenášený moment charakteristiky spojky. Jedním z předpokladů bezproblémového chodu celého zařízení je třeba co nejnižších torzních kmitů. Při těchto kmitech dochází ve spojce ke generování vířivých proudů, které následně ovlivňují chování celé soustavy.

Tomuto jevu byla podřízená celá analýza – zjištění, jak dochází k ustálení soustavy pro daný stupeň krytí. Stupeň krytí jsme měnili od 0,1 do 0,9. Soustavu jsme budili jednotkovým Dirracovým pulsem. Výsledkem analýzy bylo zjištění, že pro soustavy s pozvolnější charakteristikou dochází k pomalejšímu ustálení – déle se generují vířivé proudy.

Příklad odezvy soustavy na jednotkový puls pro stupeň krytí 0,2 je na obrázku 3.



Obr. 2: Odezva nelineární soustavy na harmonické buzení



Obr. 3: Odezva soustavy na jednotkový puls pro stupeň krytí 0,2

5.5 Experimentální modelování

Experimentální modelování je v této práci chápáno jako soustava cílevědomých a cílevědomě řízených činností a prostředků, které se provádí na reálném objektu s cílem získat objektivní informace o jeho projevech na základě přímého nebo zprostředkovaného pozorování. Experimentální modelování zahrnuje následující činnosti:

V rámci řešení problematiky bylo provedeno experimentální zjišťování momentové charakteristiky magnetické spojky za účelem verifikace výpočtového modelování a dále bylo provedeno experimentální zjišťování závislosti momentové charakteristiky na teplotě pracovního prostředí.

5.5.1 Měření momentové charakteristiky

Z výsledků výpočtového modelování vyplynulo, že veličinou, kterou je možné porovnávat a je lehce získatelná, je momentová charakteristika – závislost momentu magnetického pole na relativním natočení vnitřního rotoru vůči vnějšímu rotoru magnetické spojky.

Moment magnetického pole spojky nelze v průběhu zatěžování měřit přímo, proto bylo přistoupeno k měření zatěžovacího momentu. Tento zatěžovací moment je nutno vyvinout nějakým točivým strojem, např. elektromotorem, nebo lépe dynamometrem. Relativní natočení jsme se rozhodli realizovat pomocí upevnění vnějšího rotoru k měřicímu základy a otáčet pouze vnitřním rotorem, který je upevněn v dynamometru.

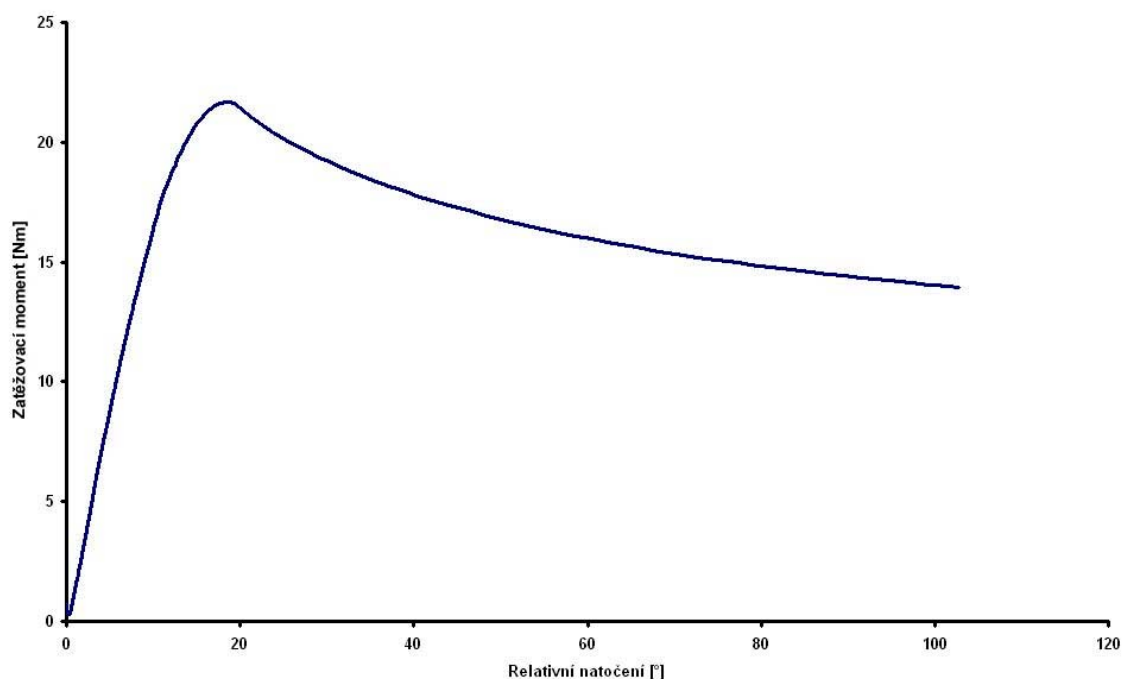
Dalším omezujícím faktorem při měření jsou magnety, které jsou velice křehké a nesmí dojít k jejich kontaktu s jiným předmětem. V případě kontaktu dochází k odlamování kousků magnetů a tím se mění přenášený moment i tvar magnetického pole. Při montáži do čerpadla se používají speciální přípravky, pomocí kterých dochází k sestavování obou částí spojky.

Abychom zajistili požadované upevnění magnetické spojky a zároveň mohli bez problémů sestavovat a opět rozebírat spojku, byl navrhnut speciální přípravek, pomocí kterého se obě části spojky sestavují a slouží i k měření. Obě části spojky se upevní na obě části měřicího přípravku a pomocí dlouhého trnu, který je vyroben s velkou přesností, je vnitřní rotor zasunut do vnějšího rotoru, který má na přípravku vyvrtanou lícovanou díru. Vnější část spojky má na svém přípravku po obvodu vyfrézované otvory, které slouží ke spojení s další částí přípravku, pomocí kterého se celý přípravek upevňuje na měřicí rošt a zamezuje pohybu vnějšího rotoru spojky. Přípravek vnitřního rotoru spojky má část, která slouží k upevnění do dynamometru.

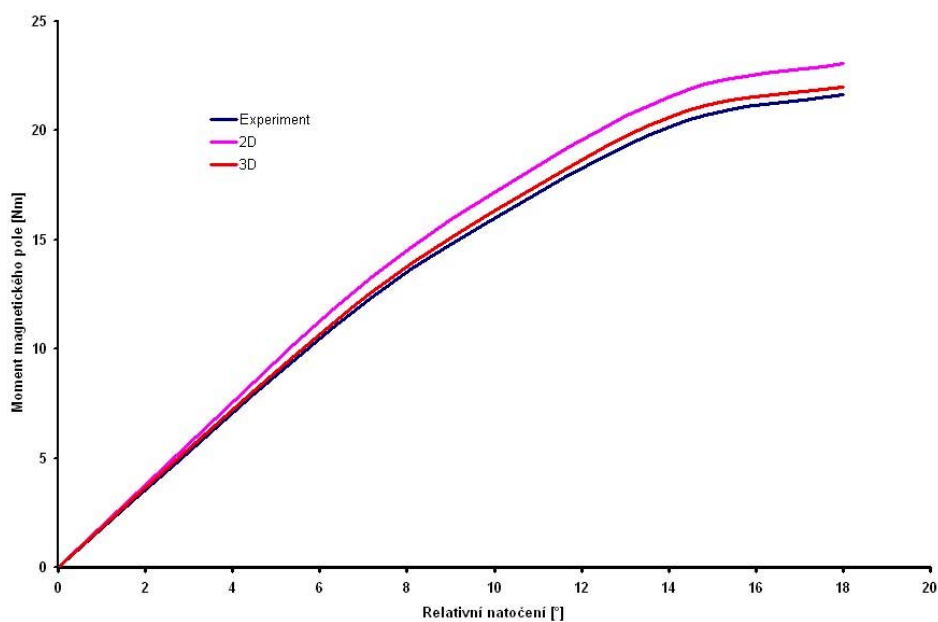
K měření relativního natočení jsme používali víceotáčkové potenciometry – aripoty. Na měření zatěžovacího momentu jsme měli snímač TorqueMaster. Signály z obou snímačů jsme přes antialiasingové filtry pomocí AD převodníku ukládali na harddisk měřicího počítače. Na měřícím počítači byl v programu LabVIEW vytvořen software na řízení a ukládání výsledků.

Měřili jsme jak stabilní část charakteristiky tak i její nestabilní polovinu. Při měření se ukázalo, že původní předpoklad, že při přeskočení magnetů a následném provozu v nestabilní části charakteristiky stačí pokles budícího momentu k opětovnému ustálení, neplatí. V případě, že dojde k prokluzu spojky, nelze jinak než úplným odstavením dosáhnout opětovně stabilního stavu.

Naměřenou charakteristiku jsme porovnali s charakteristikou vypočtenou. Porovnání prokázalo shodu s rozdílem menším než 5% a prokázalo správnost výpočtového modelování. Naměřená charakteristika je na obrázku 4, porovnání je na obrázku 5.



Obr. 4: Naměřená charakteristika magnetické spojky



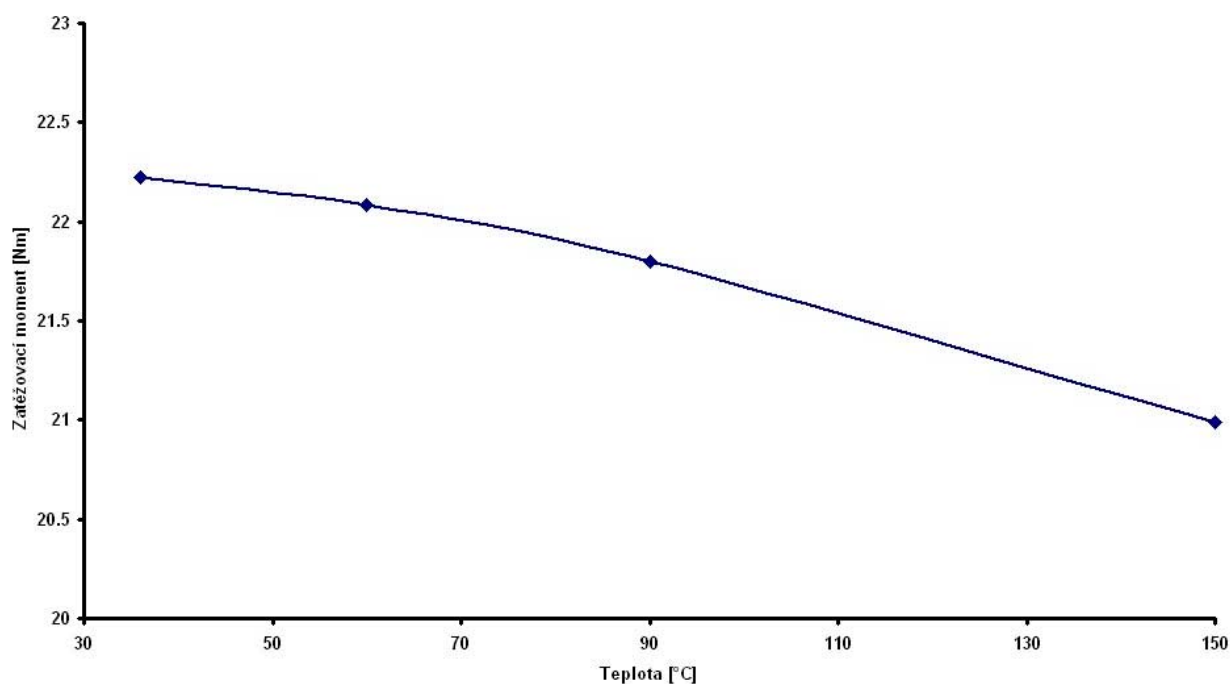
Obr. 5: Porovnání experimentu s výpočtovým modelováním

5.5.2 Měření vlivu teploty na magnetickou spojku

Jedním z nejvíce limitujících parametrů, které se vyskytují při provozu magnetických spojek, je teplota pracovního prostředí. Důvodem těchto omezení je vždy materiál permanentních magnetů. Permanentní magnety bohužel nevykazují svoje magnetické vlastnosti v celém rozsahu teplot stejně. Od určité teploty dochází k postupnému snižování magnetických schopností až do bodu, kdy přestanou mít magnetické účinky.

K měření závislosti jsme vyrobili speciální teplotní komoru, která obklopovala magnetickou spojku a sloužila k udržování teploty. Teplotní pole jsme vytvořili pomocí vzduchové pistole. Protože výrobce udává omezení pro použití spojky do 200 °C a nemohli jsme se spojku poškodit, maximální teplota, při které jsme měřili bylo 150 °C. Postupným ochlazením jsme si vytvořili další teplotní stavy – 90 °C, 60 °C a 36 °C.

Analýza prokázala postupné snižování maximální hodnoty kroutícího momentu, jak jsme předpokládali. Graficky je tato závislost znázorněna na obrázku 6.



Obr. 6: Závislost zatěžovacího momentu na teplotě

6 ZÁVĚR

Předložená práce prezentuje výsledky výpočtového a experimentálního modelování dynamických vlastností magnetické spojky a výpočtového modelování dynamického chování rotorové soustavy s magnetickou spojku v souladu s cíli, jak byly formulovány v kap. 2.

K dosažení cílů disertační práce bylo nutné realizovat následující kroky související s tvorbou výpočtových modelů:

- Vytvoření algoritmu výpočtu charakteristiky magnetické spojky. Algoritmus zahrnuje kroky potřebné k získání kompletní charakteristiky včetně nestabilní oblasti. Spojka je modelována na bázi MKP včetně svého okolí, které slouží jako okrajová podmínka. Spojka je modelována ve 2D, výpočtový experiment prokázal dobrou shodu s modelem ve 3D, který je však časově výpočetně náročnější. K výpočtu magnetického pole jsou použity reálné charakteristiky, které byly získány pomocí identifikace s experimentálním modelováním. Tyto charakteristiky jsou nelineární v celém svém rozsahu.
- Vytvoření množiny možných návrhových parametrů a provedení analýzy jejich vlivu na charakteristiku magnetické spojky. Vlivy některých parametrů byly předpokládány a výpočtové modelování je potvrdilo. U některých (obzvláště u stupně krytí) se projeví zcela nové fenomény, které se dají považovat za zcela nové a přínosné.
- Vytvoření modelu torzní rotorové soustavy na bázi MKP k provedení analýzy chování rotorové soustavy s magnetickou spojkou. Program byl vytvořen v programovém systému MATLAB s využitím nadstavby SIMULINK. Program umožňuje zavádět vazbu mezi dva rotory, čímž modeluje magnetickou spojkou. Tato vazba je možná jak lineární, tak i nelineární a neklade si žádné nároky na tvar funkce, která ji popisuje. Program bohužel obsahuje algoritmus, který předpokládá jiný druh chování v oblasti nestabilní charakteristiky, než jaký se podařilo prokázat u experimentálního modelování.

K dosažení cílů experimentálního modelování bylo nutné realizovat následující kroky:

- Navržení a výroba montážního a experimentálního přípravku pro měření charakteristiky magnetické spojky.
- Navržení a výroba experimentálního přípravku pro měření vlivu teploty pracovního prostředí na charakteristiku magnetické spojky.
- Vypracování postupu měření při obou experimentech.

Na základě provedených analýz je možno navrhnout soustavy s magnetickými spojkami. V současné době probíhá vývoj zařízení na čerpání radioaktivních solí, kde by magnetická spojka měla sloužit k přenosu výkonu z elektromotoru na čerpadlo. Dále se uvažuje o aplikacích magnetických spojek v textilních strojích a v oblastech vakuové techniky. Probíhá také výzkum možnosti modelování magnetických spojek pomocí náhradních elektrických schémat a zjišťování tlumících vlastností.

Závěrem lze říci, že hlavním přínosem práce je sestavení algoritmu pro výpočet charakteristiky magnetické spojky a analýza vlivu jednotlivých návrhových parametrů. Důležité je také provedení verifikačního experimentu, který potvrdil správnost algoritmu a výpočtového modelování spojky. Při rozboru odborné literatury nebyla nikde podobná práce nalezena. Prověření možností výpočetního modelování je také hlavním praktickým přínosem práce.

SUMMARY

The thesis submitted focuses on the issue of modelling rotor systems with magnetic drives. Due to their favourable characteristics, magnetic drives have been extensively used recently in pumping technology instead of mechanical seals. The main reason for their use is an option of hermetical closing of the medium pumped. This effect is mainly used for pumping substances that could, by their nature, endanger the safety of the surrounding environment, such as toxic or radioactive substances. The above phenomenon is also used for pumping valuable substances, where even a small wastage may entail a large financial loss.

The thesis in its introduction first lists theoretical parts that served as a basis for subsequent calculation modelling. The actual thesis deals with the calculation modelling of the magnetic drive dynamics including calculation modelling of the magnetic field in a magnetic drive, calculation modelling of the influence of design parameters on the magnetic drive characteristics, and modelling of dynamic behaviour of the rotor system with a magnetic drive. The second part of the thesis focuses on experimental modelling.

In the area of calculation modelling, the algorithm for the calculation of overall characteristics of the magnetic drive was compiled first. This algorithm was then used for all other calculations. The calculations of the magnetic field of the drive were carried out in the FEM, ANSYS system, at the level of the 2D model; the results were identical to the 3D model.

Another important part of the thesis is the analysis of the influence of design parameters on the magnetic drive characteristics. Out of the design parameters, the effect of the following ones was analysed:

- Degree of coverage (proportion between the area of the magnet and the area of the drive)
- Size of the air gap between the internal rotor and the external rotor
- Number of magnetic pairs
- Material of permanent magnets

Influences on the accuracy of the calculation modelling were also analysed:

- Influence of meshing of a finite element network
- Modelling in 2D and 3D

In the area of dynamics of rotor systems, several models of magnetic drive elements were compiled that could be used for current calculation systems. For its simplicity, a torque system was analysed. For this system, calculations of its response to various types of excitation were made, as well as an analysis of the design parameter influence (degree of coverage) on the behaviour of the rotor system.

The area of experimental modelling was divided into two parts. The first part included experimental determination of the characteristics of the magnetic drive in a stable area. The behaviour of the drive in a non-stable area was also determined. As the last one, a possibility of the magnetic drive's hysteresis was analysed. The

second part of the experimental modelling strove to ascertain the effect of temperature of the operating environment on the transferred output of the drive.

The main contribution of the thesis is the compilation of an algorithm for the calculation of the magnetic drive characteristics, and an analysis of the influence of individual design parameters. Conducting experiments that supported the correctness of the algorithm and the calculation modelling of the drive may also be considered as beneficial. On the other hand, the thesis does not include an analysis of the effect of vortical currents on the magnetic drive dynamics, for which the presence of specialists for modelling electrical phenomena is needed. This area in particular as well as the area of modelling magnetic drives using equivalent electrical diagrams may represent potential areas for further research.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Copson, M.: Sealed vs Seal-less pumps: Comparing whole-life costs and values, Mechanical Incorporated Engineer, February/March 1997, pp 15-18
- [2] Fabeck, P.: Magnetic drive pumps for the chemical industry, World Pumps, February 1995, pp 51-52
- [3] Janíček, P., Ondráček, E.: Řešení problémů modelováním, FS VUT a PC-DIR Real, Brno 1998
- [4] Klesen, Ch., Nordman, R., Matros, M.: Simulation of a Magnetic Drive Pump with Asynchronous Motor considering Nonlinear Effects, Proceedings of the Fifth International Conference on Rotor Dynamics, Darmstadt 1998, pp 876 – 887.
- [5] Kluge, M.: Close-coupled pumps, World Pumps, January 1996, pp 46-49
- [6] Peel, I.: Pumps: mechanical seal or magnetic drive, Industrial Lubrication and Tribology, Volume 48, Number 4, July/August 1996, pp 6-7
- [7] Popp, M.: Ceramic rolling bearings for magnetic drive pumps, World Pumps, October 1994, pp 38-41
- [8] Sedlák, B., Štoll, I.: Elektřina a magnetismus, Academia a Universita Karlova, Praha 1993
- [9] Slavík, J., Stejskal, V., Zeman, V.: Základy dynamiky strojů, ČVUT Praha, 1997
- [10] LeBoeuf, A. E.: An alternative to traditional sealless centrifugal pumps, World Pumps, June 1999, pp 50-52
- [11] Zacharov, B. S.: Magnitnij pribod dlja centrobežnych nasosov, Chimieskoe i neftogazovoe mašinostrojenie, č. 6/1998, str. 33-38
- [12] Miklíček, J. , Selucký, K. : Počítačová grafika – Numerické metody řešení diferenciálních úloh. Skriptum VUT Brno 1988

AUTOROVY PUBLIKACE

- [A1] Houfek, L., Fuis, V., Krejčí, P.: Behaviour of Magnetics Drive for Different Number of Magnetic Pairs And Temperatures, sborník kolokvia Dynamika strojů 2001, Praha, 2001, str. 59-64, v češtině
- [A2] Houfek, L., Fuis, V., Krejčí, P.: Experimentální a výpočtové modelování magnetické spojky, sborník konference Aplikovaná mechanika 2001, Nečtiny, 2001, str. 89-94
- [A3] Houfek, L., Fuis, V., Šťáva, Z.: Dinamika magnitogidrodinamického priroda, sborník konference Dinamika nelinejnych diskretnych elektrotechničeckich i elektronnych sistem, Čeboksary, Ruská federace, 1999, str. 136 – 137, v ruštině
- [A4] Houfek, L., Fuis, V., Šťáva, Z.: Dynamic of Magnetic Drive, sborník konference Nauka, tvorčestvo, informácia, Čeboksary, Ruská federace, 1999, str. 121, v angličtině
- [A5] Houfek, L., Fuis, V., Šťáva, Z.: Dynamika magnetických spojek, sborník konference Aplikovaná mechanika 99, Brno 1999, str. 91 – 98
- [A6] Houfek, L., Fuis, V., Šťáva, Z.: Dynamika rotorové soustavy s magnetickou spojkou, sborník konference Inženýrská mechanika 99, Svatka, 1999, str. 51 – 54.
- [A7] Houfek, L., Fuis, V., Šťáva, Z.: Vliv návrhových parametrů na momentovou charakteristiku magnetické spojky, sborník kolokvia Dynamika strojů 99, Praha, 1999, str. 87 – 92
- [A8] Houfek, L., Fuis, V.: Dynamika magnetických spojek, příspěvek v časopise Inženýrská mechanika, číslo 6, ročník 7, str. 435-448
- [A9] Houfek, L., Fuis, V.: Dynamika magnetických spojek, sborník konference Aplikovaná mechanika 2000, Liberec, 2000, str. 99-102
- [A10] Houfek, L., Fuis, V.: Dynamika magnetických spojek, sborník mezinárodní vědecké konference u příležitosti 50. let od založení FS na VŠB v Ostravě, Ostrava, 2000, str. 31-36
- [A11] Houfek, L., Král, P., Fuis, V.: A New Approach To The Modelling of Magnetic Drive, sborník kolokvia Dynamika strojů 2000, Praha, 2000, str. 103-108, v češtině
- [A12] Houfek, L., Krejčí, P., Fuis, V.: Dynamics of Magnetic Drive, sborník konference Inženýrská mechanika 2000, Svatka, 2000, str. 69-74, v češtině
- [A13] Houfek, L., Krejčí, P.: Výpočtová a experimentální analýza chování magnetické spojky, sborník pedagogicko-vědecké konference u příležitosti 100. výročí založení FSI VUT, Brno, 2000, str. 83-86
- [A14] Houfek, L., Šťáva, Z.: Dynamická analýza mechanických vlastností rotorové soustavy s magnetickou spojkou, sborník konference Výpočtová mechanika 98, Pernink, 1998, str. 77 – 84

ŽIVOTOPIS

Narozen: 12. 9. 1973 v Ivančicích

Bydliště: U mlýnka 6, 664 12 Oslavany

Vzdělání:

1980 - 1988 ZŠ Oslavany

1988 - 1992 Gymnázium Jana Blahoslava, Ivančice

1992 - 1997 VUT - FS, Brno - název diplomové práce - Výpočtová a experimentální analýza dynamického chování rotorové soustavy leteckého motoru M701

1997 - 2001 VUT - FSI - Ústav mechaniky těles - doktorandské studium

Praxe:

Od 2000 výzkumný pracovník na společném pracovišti FSI VUT Brno a ÚT AV ČR Praha

Vědecká práce:

Výzkum v oblasti dynamiky rotorových soustav a experimentálního zjišťování dynamických vlastností soustav.

Výuka:

Základní kursy - cvičení Statika, kinematika, dynamika a pružnost a pevnost I.

Specializace - cvičení Numerické metody mechaniky I.

Jazykové znalosti:

Angličtina a ruština.

Účast na řešených grantových projektech:

GAČR 101/96/0781 - Analýza dynamických vlastností vázaných rotorových soustav s poddajnou nerotující částí a nelineárními vazbami.

Fond aktivit pro vědy a umění VUT, FV 380007/98 - Analýza dynamických vlastností rotorových soustav s magnetickými spojkami.

GAČR 101/99/1327 - Nový přístup k modelování nelineárních vazebných elementů vázaných rotorových soustav.

pilotní projekt ÚT AV ČR č. 52017