

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TELES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

AKTIVNÍ ŘÍZENÍ PŘEDPĚTÍ JEDNOTEK VŘETEN OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

ACTIVE PRELOAD CONTROL OF MACHINE TOOL SPINDLE UNITS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RUDOLF CYPRIAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. Ing. TOMÁŠ BŘEZINA,
CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Rudolf Cyprian

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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 bakalářské práce:

Aktivní řízení předpětí jednotek včetně obráběcích strojů

v anglickém jazyce:

Active Preload Control of Machine Tool Spindle Units

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Provést a vyhodnotit rešerši k současnému stavu řešení vymezené problematiky.
2. Na tomto základě podle pokynu školitele zvolit a sestavit zjednodušený simulační model chování s použitím Matlab/Simulink.
3. Provést vyhledávací simulace.
4. Výsledky simulací interpretovat se zřetelem k praktickým hlediskům.

Cíle bakalářské práce:

Získat prakticky interpretovatelné výsledky vyhledávacích simulací.

Seznam odborné literatury:

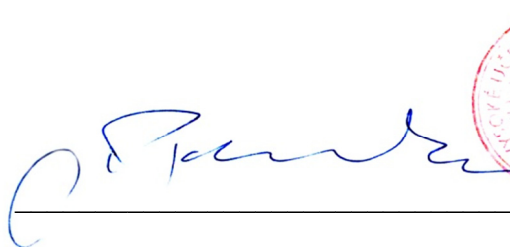
ABELE,E.; ALTINTAS,Y.; BRECHER, C.: Machine tool spindle units, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59, No. 1, 2010, pp.781–802, ISSN 0007-8506.

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011

V Brně: 23.11.2010

L.S.



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.

Děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca popisuje rôzne varianty aktívneho riadenia predpätia na základe požiadavkov výrobnjej sféry. A zároveň hodnotí ich výhody a nevýhody na základe nadobudnutých znalostí.

V programe Matlab/Simulink bol vytvorený model riadenia predpätia na kosouhlom ložisku. Hodnoty pre simuláciu som čerpal z vedeckých článkov.

Kľúčové slová

Predpätie, Piezo, Elektromagnet, Odstredivý člen, Vplyv oteplenia, Hydraulika, Matlab, Simulink, Model, Riadenie

Abstract

This work describes some kinds of active preload control of machine tool spindle units based on industry requirements. And it compares their advantages and disadvantages based on obtained knowleges.

For simulation was used Matlab/Simulink, where proposed model was created. All values was gathered from publications.

Key words

Preload, Piezo, Electromagnet, Centrifugal device, Thermal effect, Hydraulic, Matlab, Simulink, Model, Control

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne na základe pokynov a rád vedúceho práce a že som všetky použité literárne a internetové zdroje uviedol v zozname použitej literatúry.

V Brne dňa: 27.05.2011


.....
Rudolf CYPRIAN

Pod'akovanie

Chcel by som poďakovať všetkým, ktorí mi pomohli pri vypracovaní tejto bakalárskej práce. Predovšetkým by som rád poďakoval vedúcemu svojej práce doc. RNDr. Ing. Tomášovi Březinovi, CSc. za rady a pomoc a taktiež Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D. za jeho rady.

Obsah

1. Úvod	11
2. Úvod do problematiky	13
3. Analýza problému.....	15
3.1. Hlavný účel predpätia ložísk:.....	16
3.1.1. Zvýšenie tuhosti.....	16
3.1.2. Zníženie hlučnosti.....	16
3.1.3. Zvýšenie presnosti vedenia hriadeľa.....	16
3.1.4. Kompenzácia opotrebenia uloženia a sadnutia ložiska za prevádzky	16
3.1.5. Dosiachnutie dlhej prevádzkovej životnosti.....	16
4. Pasívne predpätie.....	19
4.1. Konštantné predpätie.....	19
4.2. Pružinové predpätie.....	19
4.3. Predpätie pomocou rozperných krúžkov.....	20
5. Aktívne riadenie predpätia.....	21
5.1. Princíp	21
5.1.1. Tepelný nárast na ložiskách.....	21
5.1.2. Predpätie pre nízke otáčky	21
5.1.3. Predpätie pre vysoké otáčky	22
5.2. Predpätie hydraulickým tlakom	24
5.3. Piezoaktuátor s integrovanou hydraulickou prevodkou.....	25
5.4. Tepelné predpätie	27
5.5. Elektromagnet	30
5.6. Predpätie za využitia odstredivej sily.....	32
6. Praktická časť	35
7. Záver.....	39
Bibliografie	41
Prílohy	42

1. Úvod

V dnešnej dobe sa požaduje, aby boli obrábacie stroje vysokorýchlostné a aby dokázali pracovať pri rôznych rýchlostiach. To vedie k zvyšovaniu efektívnosti obrábania, teda k dosahovaniu čo najkratších produkčných časov, k zvyšovaniu a variabilite otáčok vretien a množstva odoberaného materiálu (axiálne a radiálne), k vysokej tuhosti systému a k znižovaniu trenia, a to všetko na jednom obrábacom stroji. Príčinou sú, samozrejme ekonomické a environmentálne dôvody.

Všetky tieto vlastnosti závisia od použitých ložísk a tie od toho, ako dokážeme regulovať predpätie pri rôznych rezných rýchlostiach.

Správne nastavenie predpätia zvýši tuhosť (v axiálnom aj radiálnom smere), úroveň presnosti, ovplyvňuje životnosť ložiska a potlačí vibrácie a hluk spôsobené "veľkou" vôľou v guľkových ložiskách.

2. Úvod do problematiky

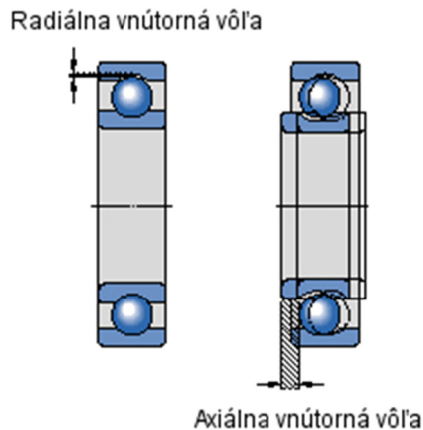
S vývojom vysokorýchlostných obrábacích strojov sa vyžaduje, hlavne pre vysokootáčkové frézovanie, aby bolo možné vykonávať hrubé obrábanie materiálu pri nízkych otáčkach a dokončovacie obrábanie pri vysokých otáčkach na jednom stroji. Preto je dôležité, aby bola zaistená vysoká tuhosť pri hrubom obrábaní a nízky nárast teploty pri vysokých otáčkach. Doteraz tradičné konštantné predpätie už nevyhovuje technickým požiadavkám tohto druhu.

V dnešnej dobe sa najčastejšie v obrábacích strojoch používajú guľkové ložiská s kosouhlým stykom, pretože zvládajú vysoké zaťaženie, vysokú presnosť, generujú primerané množstvo tepla (avšak pri vysokých otáčkach generujú veľké množstvo tepla), sú štandardizované a sú nielen cenovo dostupné. Potrebujú však byť predpäté za účelom dodržania konštantného kontaktného uhla. Najmodernejšie ložiská sú prevádzky schopné až do hodnôt okolo 3 miliónov DN [11] ($DN = \text{vnútorný priemer ložiska [mm]} \times \text{uhlová rýchlosť [ot} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$), čo sa dá porovnať s aerostatickými alebo magnetickými ložiskami, avšak za podstatne nižšiu cenu a s možnosťou väčšieho zaťaženia.

Presnosť obrábania sa v leteckom a polovodičovom priemysle posunula z mikro úrovne do nano úrovne a zároveň sa zvýšili otáčky. Preto je potrebné dosiahnuť vysokú stabilitu celého systému, ktorá bude schopná adaptovať sa aktuálnym podmienkam a zabezpečiť čo najideálnejší priebeh obrábania. Dá sa dosiahnuť najlepšie kombináciou viacerých prvkov. Riadenie predpätia na ložiskách kvôli dodržaniu kontaktného uhla pri rôznych rýchlostiach vretena, zníženie kmitania pomocou magnetického ložiska, kompenzovanie priehybu nástroja, vyvažovaním vretena...

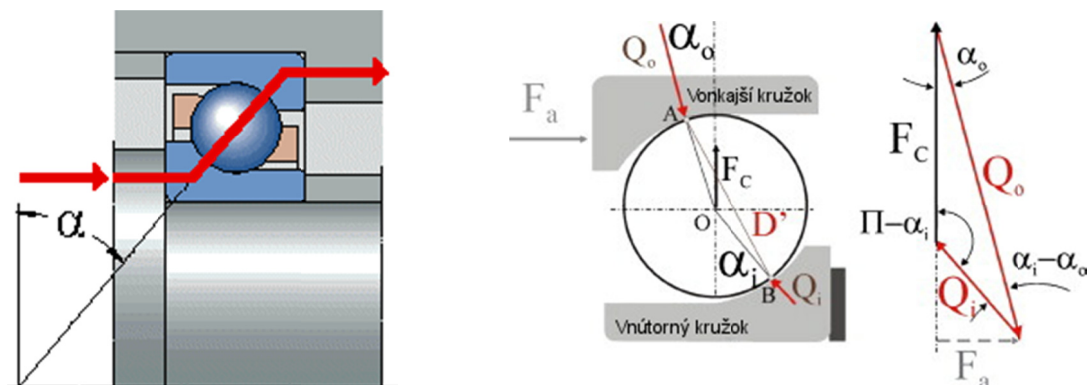
3. Analýza problému

Kľúčovým komponentom vretenových jednotiek sú použité ložiská na vretene, ktoré najviac vplývajú na charakteristiku celého systému. Momentálne najviac komerčne využívané vysokorýchlostné vretená v obrábacích strojoch sú vybavené guľkovými ložiskami s kosouhlým stykom, ktoré však musia byť predpäté. Ich vlastnosti sa odvíjajú do otáčok a od predpätia. Tieto ložiská majú jak radiálnu, tak axiálnu vôľu. Axiálnu vôľu regulujeme predpätím a veľkosť radiálnej vôle závisí od otáčok.



Obr. č. 1: Axiálna a radiálna vnútorná vôľa [1]

Pri inštalácii ložisk do systému obrábacieho stroja je nutné použiť určité množstvo počiatočného prepätia. Dôvodom je to, aby sa za prevádzky dosiahla v uložení záporná axiálna vôľa a aby bol zabezpečený požadovaný stykový uhol bodového kontaktu medzi guľôčkami a krúžkami ložiska. Ďalšími dôvodmi sú zvýšenie tuhosti systému a úroveň presnosti pri rotácii. Zároveň sa tým dosiahne aj potlačenie vibrácií a hluku, spôsobeného veľkou vôľou v guľôčkových ložiskách.



Obr. č. 2: Uloženie a pôsobenie síl v guľkových ložiskách s kosouhlým stykom [1]

Nesmie sa však zabudnúť, že pri stanovení počiatočnej sily predpätia nesmieme prekročiť optimálnu hodnotu, pretože by sa tuhosť síce zvýšila, ale nepatrne, zato však trenie a prevádzková teplota by sa zvýšili, čo by viedlo k zníženiu trvanlivosti ložiska.[1]

Keď sú ložiská v kľude (nerotujú), kontaktné uhly medzi guľôčkami a vnútorným/vonkajším krúžkom sú identické. Výchylku guľkového ložiska spôsobuje Hertzianovo napätie, pôsobiace v bode kontaktu, a tuhosť zvyčajne rastie spolu so zvyšujúcim sa predpätím.

Keď ložisko začne rotovať, bude vnútorný a vonkajší kontaktný uhol rôzny kvôli pôsobeniu odstredivej sily a gyroskopického momentu. Ďalej sa k tomu pridružuje aj trenie, ktoré vzniká medzi povrchmi kontaktných plôch.

3.1. Hlavný účel predpätia ložísk:

- zvýšenie tuhosti,
- zníženie hlučnosti,
- zvýšenie presnosti vedenia hriadeľa,
- kompenzácia opotrebenia uloženia a sadnutia za prevádzky,
- dosiahnutie dlhej prevádzkovej životnosti.

3.1.1. Zvýšenie tuhosti

Tuhosť ložiska ($kN/\mu m$) je definovaná ako pomer síl pôsobiacich na ložisko a pružnej deformácie. Pružná deformácia vyvolaná zaťažením je pri určitom rozsahu zaťaženia menšia v predpätom ložisku ako v nepredpätom.[1] So zvyšovaním predpätia rastie aj radiálna, aj axiálna tuhosť a zároveň sa tým potlačujú vibrácie.

3.1.2. Zníženie hlučnosti

Čím menšia je prevádzková vôľa v ložisku, tým sú lepšie vedené valivé telesá v nezaťaženej oblasti, a tým je aj tichší chod ložiska.

3.1.3. Zvýšenie presnosti vedenia hriadeľa

Uloženie hriadeľa na predpätých ložiskách vykazuje presnejšie vedenie hriadeľa, pretože priehyb hriadeľa pri rovnakom zaťažení je menší.

3.1.4. Kompenzácia opotrebenia uloženia a sadnutia ložiska za prevádzky

Vplyvom opotrebenia a sadnutia ložiska vzrastá vôľa, ktorá je však vyrovnaná predpätím

3.1.5. Dosiahnutie dlhej prevádzkovej životnosti

Správne zvolené predpätie zvyšuje prevádzkovú spoľahlivosť a predlžuje životnosť. Zaisťuje tiež priaznivé rozdelenie zaťaženia v ložisku.

Avšak, treba dávať pozor na určité zásady pri stanovení predpätia.

Čím viac zvyšujeme predpätie, tým viac sa zvyšuje tuhosť guľkového ložiska, ale spôsobuje to aj poškodzovanie a zmenšovanie olejového filmu vysokým napätím kontaktných plôch guľôčok a vnútorného a vonkajšieho krúžku ložiska, čo zase ovplyvňuje životnosť ložiska.

V podstate, keď má vreteno vysoké otáčky, tak vnútorné zaťaženie ložiska značne narastá vďaka efektu odstredivej sily a vďaka vzniku tepla. Nadmerné predpätie pri týchto podmienkach spôsobí výrazné skrátenie životnosti ložísk. Preto je vo všeobecnosti používané

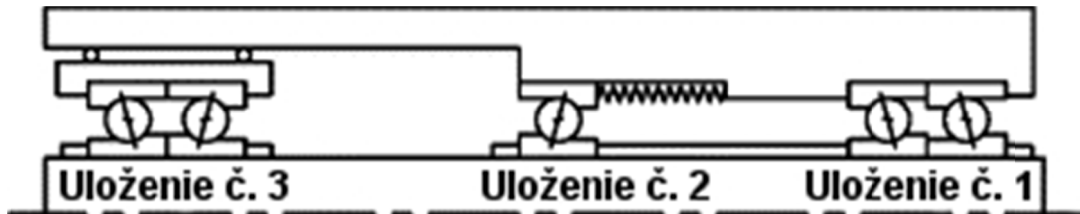
malé predpätie pre vysoké otáčky a dokončovacie obrábanie. A veľké predpätie na malé otáčky a hrubé obrábanie.

Z toho vyplýva, že keď použijeme vysoké predpätie, nemôžeme pracovať vo vysokých otáčkach, no zato máme zlepšenú tuhosť systému. A naopak, keď požadujeme vysoké otáčky s malým predpätím, značne sa nám zníži tuhosť.

4. Pasívne predpätie

Na základe požiadaviek, aby bolo možné vykonávať hrubé a dokončovacie obrábanie na jednom obrábacom stroji, musí byť možnosť meniť predpätie na základe požadovaných otáčok a spôsobu obrábania, čo u klasického konštantného predpätia nebolo možné. To bolo vykonávané tromi hlavnými spôsobmi [7]:

- konštantné predpätie,
- pružinové predpätie,
- predpätie pomocou poistných krúžkov.



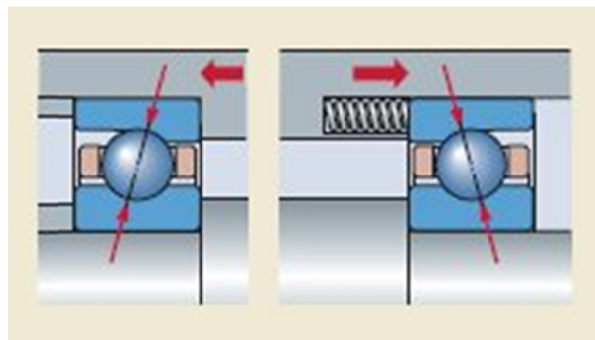
Obr. č. 3: Realizácia pasívneho predpätia [7]

4.1. Konštantné predpätie

V presných vysokootáčkových uloženiach je veľmi dôležité zaistiť konštantné a rovnomerné predpätie. Na jeho vytvorenie sa používajú mäkké kalibrované lineárne pružiny, ktoré sú umiestnené medzi vonkajším krúžkom a osadením v telese. Pri použití pružín za bežných prevádzkových podmienok nemajú kinematické správanie a tepelná rozťažnosť ložiska vplyv na predpätie.

4.2. Pružinové predpätie

Princíp pružinového predpätia je podobný ako u konštantného predpätia, ale pružina, ktorá sa použije na vytvorenie predpätia, nie je mäkká (vinuté, tanierové). V takto predpätom ložisku spôsobuje tepelná rozťažnosť prídavné predpätie, ktorého sila je rovná súčinu tuhosti pružiny a tepelnej rozťažnosti. Najčastejšie využívaný spôsob predpätia v komerčnom svete.



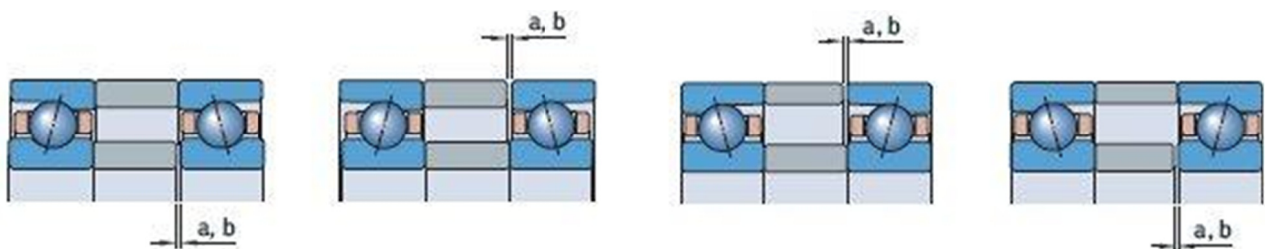
Obr. č. 4: Realizácia predpätia pomocou dištančných krúžkov a pomocou pružiny [1]

4.3. Predpätie pomocou rozperných krúžkov

Dve sady ložísk (alebo aj viac) sú poistené voči posunutiu maticou. Veľkosť predpätia závisí na kontaktnom uhle, vnútornej geometrii, veľkosti ložiska a tepelnej rozťažnosti vretena a skrine. Takisto závisí na ich usporiadaní, kombinácii a na usporiadaní v kombináciách (do “O” – chrbtami k sebe alebo do “X” – čelami k sebe).[1, 7] Pomocou týchto rozperných krúžkov, vložených medzi ložiská, môžeme zvýšiť alebo znížiť ich predpätie.

Je vhodné ich použiť, ak treba zvýšiť tuhosť systému, alebo ak sa trysky mazania olej-vzduch [1] musia nachádzať čo najbližšie k obežným dráham ložiska alebo je potrebný dostatočne veľký priestor pre prebytočné plastické mazivo z dôvodu zníženia tepla vznikajúceho v ložisku.

Predpätie sady ložísk je možno meniť voľbou šírky vnútorného alebo vonkajšieho rozperného



krúžku.

Obr.č.5 : Smerodajné hodnoty zmenšenia rozperného krúžku [1]

Zmena predpätia	Zmena šírky	Potrebný rozperný krúžok	
	Hodnota	do “O”	do “X”
<i>Zväčšenie predpätia</i>			
z A na B	a	vnútorný	vonkajší
z B na C	b	vnútorný	vonkajší
z A na C	a + b	vnútorný	vonkajší
<i>Zmenšenie predpätia</i>			
z B na A	a	vonkajší	vnútorný
z C na B	b	vonkajší	vnútorný
z C na A	a + b	vonkajší	vnútorný

Tab. č.1: Smerodajné hodnoty zmenšenia rozperného krúžku [1]

Kde a , b je potrebné zmenšenie šírky rozperného krúžku a hodnoty A, B, C sú triedy predpätia

5. Aktívne riadenie predpätia

5.1.Princíp

Tuhosť a presné radiálne vedenie predstavujú kritické parametre pre uloženie ložísk. Hlavne pri pôsobení rôznych striedavých axiálnych síl. Toto predpätie sa nastavuje vzájomným nastavením ložiskových krúžkov voči sebe v axiálnom smere. Avšak, v závislosti na type ložiska a materiálu guľôčok, sa predpätie výrazne zvyšuje v závislosti na otáčkach.

Keď zväžíme aký efekt má axiálne predpätie na životnosť ložiska a na dynamickú stabilitu, dospejeme k tomu, že existuje určitá hodnota predpätia, ktorá zaisťujú vyššiu životnosť ložiska a nižšie hodnoty vibrácii pri daných otáčkach. A že so zvyšovaním predpätia dosiahneme aj posunutie vlastnej frekvencie do vyšších hodnôt. [7] Z toho vyplýva, že potrebujeme ľubovoľne meniť aplikované predpätie.

V podstate treba zabezpečiť, aby v oblasti nízkych otáčok pri hrubom obrábaní pôsobilo väčšie predpätie, ktoré zabezpečí vysokú tuhosť vretena a potlačí v danej miere jeho vibrácie. Obdobne to platí v oblasti vysokých otáčok, kde kvôli prehrievaniu sa ložiska by malo pôsobiť menšie predpätie, ktoré zredukuje množstvo vyprodukovaného tepla, predĺži jeho životnosť a zároveň bude dostačujúce, aby dosiahlo potrebnú tuhosť.

Zavedieme pár predpokladov pre vytvorenie modelu [6]

- Model je axisymetrický; zanedbáme všetky vyvrtané diery, mikroštruktúry
- Akonáhle sa ložisko dostane do vysokých otáčok, teplo je distribuované do všetkých smerov rovnomerne a teploty na guľkách ložiska sú rovnaké.
- Zanedbávame tepelné vyžarovanie do okolitého prostredia

Hlavnými zdrojmi tepla v obrábacom stroji sú ložiská na vretene a obrábanie materiálu. Avšak, väčšina tepla vytvoreného obrábaním je odvedená chladiacou kvapalinou, takže jeho pôsobenie môžeme zanedbať.

5.1.1. Tepelný nárast na ložiskách

Teplota ložiska bude pri konštantnom predpätí narastať skoro lineárne so zvyšujúcimi sa otáčkami. Avšak, teplota ložiska pri nastaviteľnom predpätí bude väčšia ako pri konštantnom, keď otáčky klesnú pod určitú hodnotu a bude klesať, keď prekročí iné, vyššie otáčky. [7, 11, 10,]

5.1.2. Predpätie pre nízke otáčky

Najvhodnejšie predpätie pre nízke otáčky dostaneme z únavovej životnosti. Únavová životnosť bola prvýkrát prezentovaná Lundbergom a Palmgrenom [8] a nakoniec bola uznaná International Standards Organization ako norma ISO 281/1

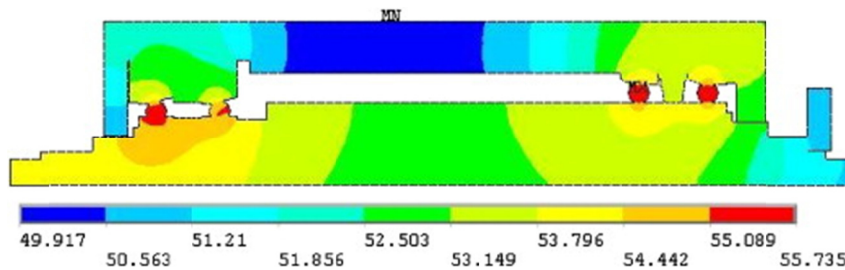
$$L_{10} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{F_r}{P_r} \right)^\epsilon \quad (5.1.)$$

kde $P_r = XF_r + YF_a$; hodnoty X a Y udáva výrobca a parameter $\varepsilon = 3$ pre guľkové ložiská.

5.1.3. Predpätie pre vysoké otáčky

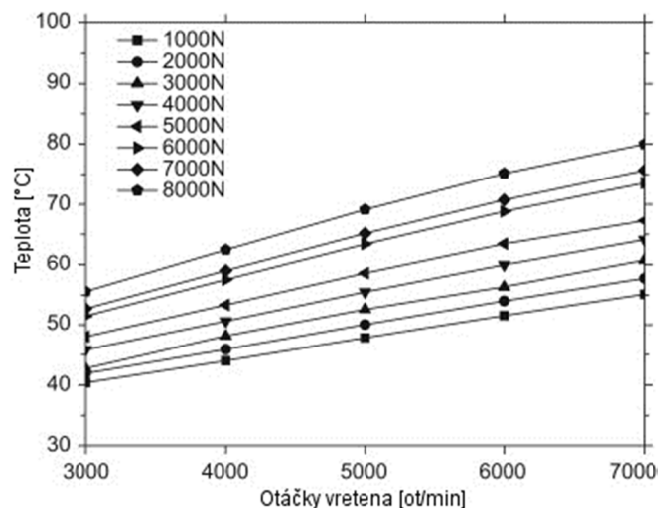
Keď ložisko pracuje vo vysokých otáčkach, vedie to k väčšiemu nárastu teplôt. Hlavne ak je ložisko mazané vazelínou. Je to kvôli tomu, že pri vysokých otáčkach pôsobí odstredivý moment, ktorý zahŕňa aj rotačný moment, ktorý závisí od viskozity a daného zaťaženia.

Nakoľko je vreteno považované za axisymetrické, dá sa navrhnuť ako zjednodušený 2D model v MKP. Na základe MKP [6] sa dá nasimulovať distribúcia tepla do vretenovej jednotky. Maximálnu teplotu z celého systému budú mať guľky, pretože ložisko ako jediné vytvára pri svojej činnosti teplo a tepelná kapacita guľôčok je relatívne malá. Teplota sa samozrejme rozvádza od ložísk do celého systému, ako ukazuje obr. č. 6. Rozdiel medzi teplotou distribuovanou do hriadeľa a do skrine je spôsobený tým, že medzi vonkajším krúžkom ložiska a skriňou je malá tepelná vodivosť.



Obr. č. 6: Šírenie tepla v obrábacom stroji [6]

Na obr. č. 7 vidno vzťah medzi teplotami ložiska a otáčkami pri rôznom predpätí. Ako vidno, všetky teploty narastajú skoro lineárne so zvyšujúcim sa predpätím a otáčkami. Pre konštantné otáčky platí, podľa technických štandardov obrábacích nástrojov, že maximálne nárast teploty na ložisku môže byť 25°C.



Obr. č. 7: Závislosť teploty na otáčkach pre rôzne predpätia [6]

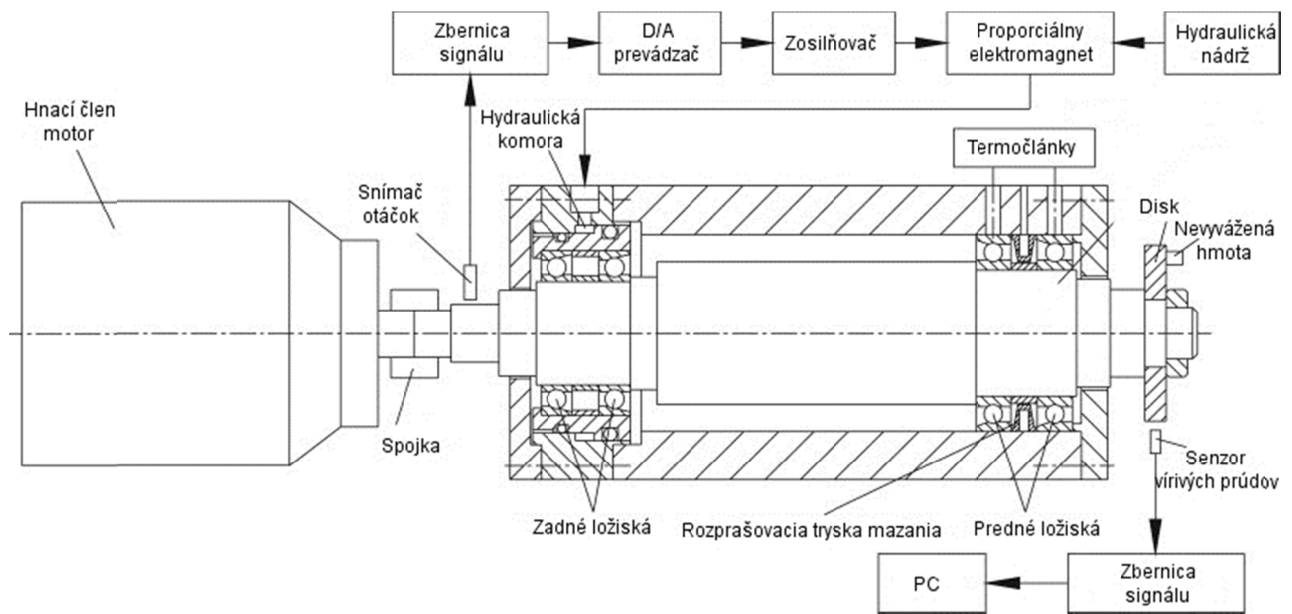
Hlavným zámerom je dosiahnutie variabilného predpätia, ktoré bude schopné zabezpečiť vhodné predpätie pre celý rozsah pracovných rýchlostí a zároveň bude mať dostatočné tepelné a dynamické vlastnosti, aby bolo možné vykonávať hrubé i dokončovacie obrábanie na jednom obrábacom stroji.

Doteraz bolo otestovaných mnoho metód, ako dosiahnuť vhodné variabilné predpätie, ktoré by malo požadované vlastnosti. Ako napríklad:

- hydraulickým tlakom,
- piezoelektrickým aktuátorom,
- tepelným predpätím,
- elektromagnetom,
- odstredivým zariadením.

5.2. Predpätie hydraulickým tlakom

Ako ukazuje obrázok č. 8 [6], na hriadeľi vretena sú uložené dve ložiská s kosouhlým stykom, ktorých predpätie zabezpečuje hydraulická komora. Hydraulický tlak vyvoláva posunutie v axiálnom smere a tlačí na vonkajší krúžok zadného ložiska a teoreticky by malo toto posunutie skrz hriadeľ pôsobiť aj na vnútorný krúžok predného ložiska. Toto posunutie vyvolané hydraulickým tlakom je vlastne axiálna sila, ktorá zvyšuje predpätie ložísk. Toto predpätie je na každom ložisku rovné polovici aktuálneho hydraulického tlaku.



Obr. č. 8: Schéma hydraulicky riadeného predpätia [6]

Princíp ovládania variabilného predpätia

Snímačom rýchlosti sa snímajú otáčky vretena, ktoré sú potom prevedené D/A konvertorom do prúdového zosilňovača. V dôsledku toho sa zmení prúd elektromagnetu, a ten ovplyvní hydraulický tlak v komore, čím sa upraví predpätie ložísk. Takto je možné meniť kedykoľvek počas behu obrábacieho stroja predpätie na ložiskách.

Nárast teploty predných ložísk je meraný termočlánkom a výchylku upínača sleduje senzor vírivých prúdov.

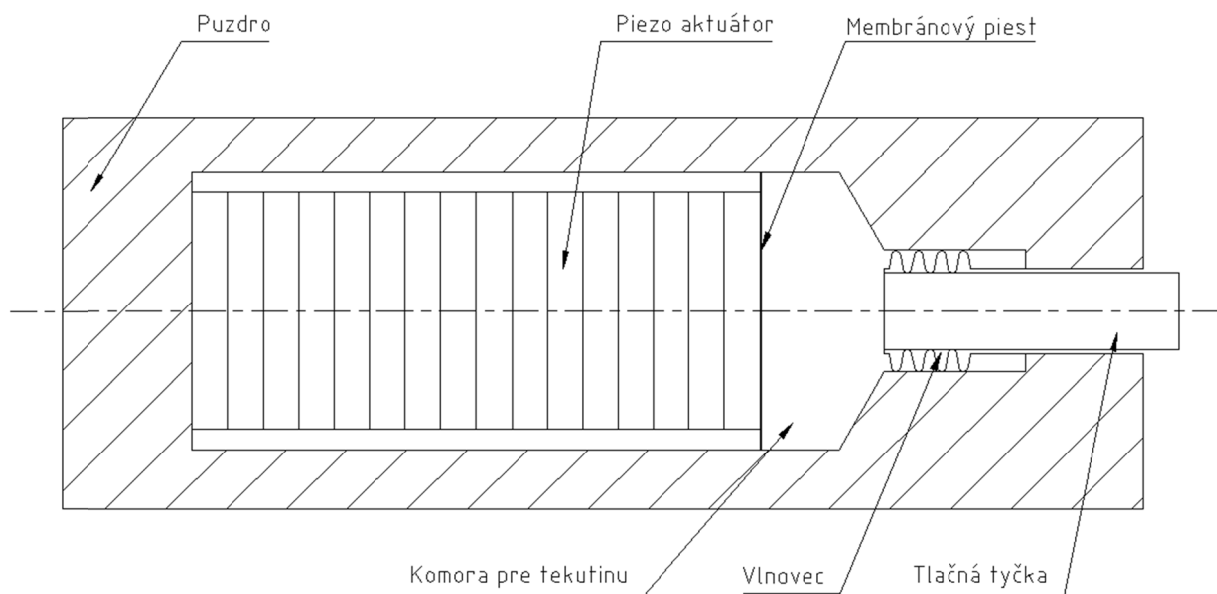
Nevýhody

Korelácia medzi množstvom otáčok a predpätím je nepresná a toto riešenie patrí k tým drahším.

Nutnosť prídavného rozloženého zariadenia, ktoré bude vytvárať hydrostatický tlak.

5.3. Piezoaktuátor s integrovanou hydraulickou prevodovkou

Piezomodul [2,3,10] má kompenzovať radiálne a axiálne odchýlky vretena, ktoré spôsobujú odstredivé sily a tepelne ovplyvnené miesta. Elektrické správanie piezoaktuátora je rovnaké ako kondenzátoru, takže ho dokážeme riadiť len zmenou napätia. Ak poznáme mechanické správanie sa komponentov, môžeme úspešne navrhnuť piezomodul. Jeho mechanickú energiu vytvára piezokeramika. Mechanické správanie piezokeramiky môžeme prirovnať k správaniu sa pružiny. Piezokeramika nemá dostatočnú schopnosť rozťahovať sa v axiálnom alebo radiálnom smere $\delta \cong 0.001 \times l$; kde l je dĺžka piezokeramiky (rádovo niekoľko jednotiek až desiatok μm) [12]. Takže by bolo potrebné mať vcelku veľký piezoaktuátor, ktorý by zvládol vyregulovať axiálne vychýlenie ložiska. Preto je potrebné integrovať do tohto systému prevodovku. V konvenčných aplikáciách sa používa na pozičnú kontrolu páková prevodovka, ktorá však zaberá veľa miesta. Ako ďalšia vhodná alternatíva sa ukázala byť hydrostatická prevodovka, pretože je veľmi kompaktná [10],



Obr. č. 9: Schéma piezoaktuátora [2,3,10]

Kombináciou piezokeramiky a hydraulickej prevodovky vznikne piezomodul. Štruktúra piezomodulu je na obr. č. 9. Pozostáva z puzdra, v ktorom je uložený piezoaktuátor, a hydraulickej komory. Komora je naplnená tekutinou. Na voľnom konci piezoaktuátora je nasadený membránový piest. Na druhej strane komory sa nachádza vlnovec.

Princíp

Piezoaktuátor pri svojej expanzii tlačí na membránový piest, čím vyvoláva aj tlak na tekutinu v komore a tá sa začne posúvať. Na základe nestlačiteľnosti kvapaliny zostáva jej objem konštantný. To spôsobuje tlak a posunutie vlnovca, ktorý vysúva tlačnú tyčku. Teoretický prevodový pomer sa získa z efektívnej plochy membránového piesta A_p a efektívnej plochy vlnovca A_s [10]

Teoretický prevodový faktor popisuje pomer posunutia tlačnej tyčky (sekundárnej časti) k posunutiu membránového piestu (primárnej časti)

$$i = \frac{A_p}{A_s} \quad (5.2.)$$

Pracovný bod piezomodulu sa nastavuje v pokoji. Riadenie piezomodulu sa dá vykonávať jednoducho cez regulátor so spätnou väzbou.

Výhody

Môžu byť riadené jedným vysokonapäťovým zosilňovačom.

Záťažná charakteristika piezomodulu je takmer identická, čo znamená, že náboj na piezoaktuátore je priamo úmerný napätiu

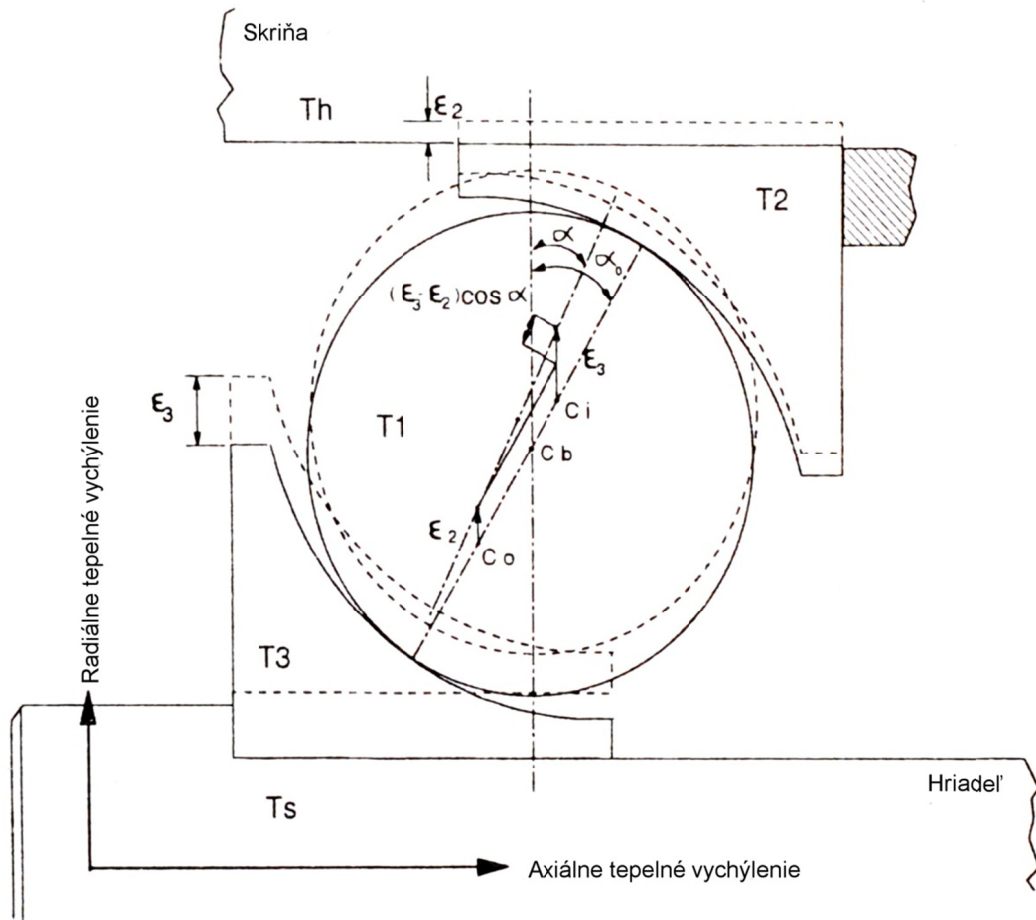
Nevýhody

Piezoaktuátor má hlavný efekt na výslednú flexibilitu, ktorá je však indikátorom kvality prevodového pomeru hydraulickej prevodovky

Na dosiahnutie potrebného predpätia je potrebných viac ako jeden piezomodul, pretože hydraulická prevodovka znižuje silu, ktorá bude pôsobiť na ložisko. Keďže musia byť použité minimálne dva piezomoduly, musia byť oba predpäté na presne rovnakú hodnotu.

5.4. Tepelné predpätie

Nakoľko ložiská v obrábacích strojoch produkujú veľké množstvo tepla pri vysokých otáčkach, kompenzácia tepla v stroji sa stáva nadmieru dôležitou, avšak odoberanie tepla z vretena by malo byť vykonávané veľmi opatrne [11]. Náhodné regulovanie zredukuje životnosť ložiska. Regulácia tepla vytvoreného ložiskami a samotnú reguláciu predpätia je možné vykonávať dôkladnou kontrolou cirkulácie chladiacej alebo ohrievacej kvapaliny okolo skrine.



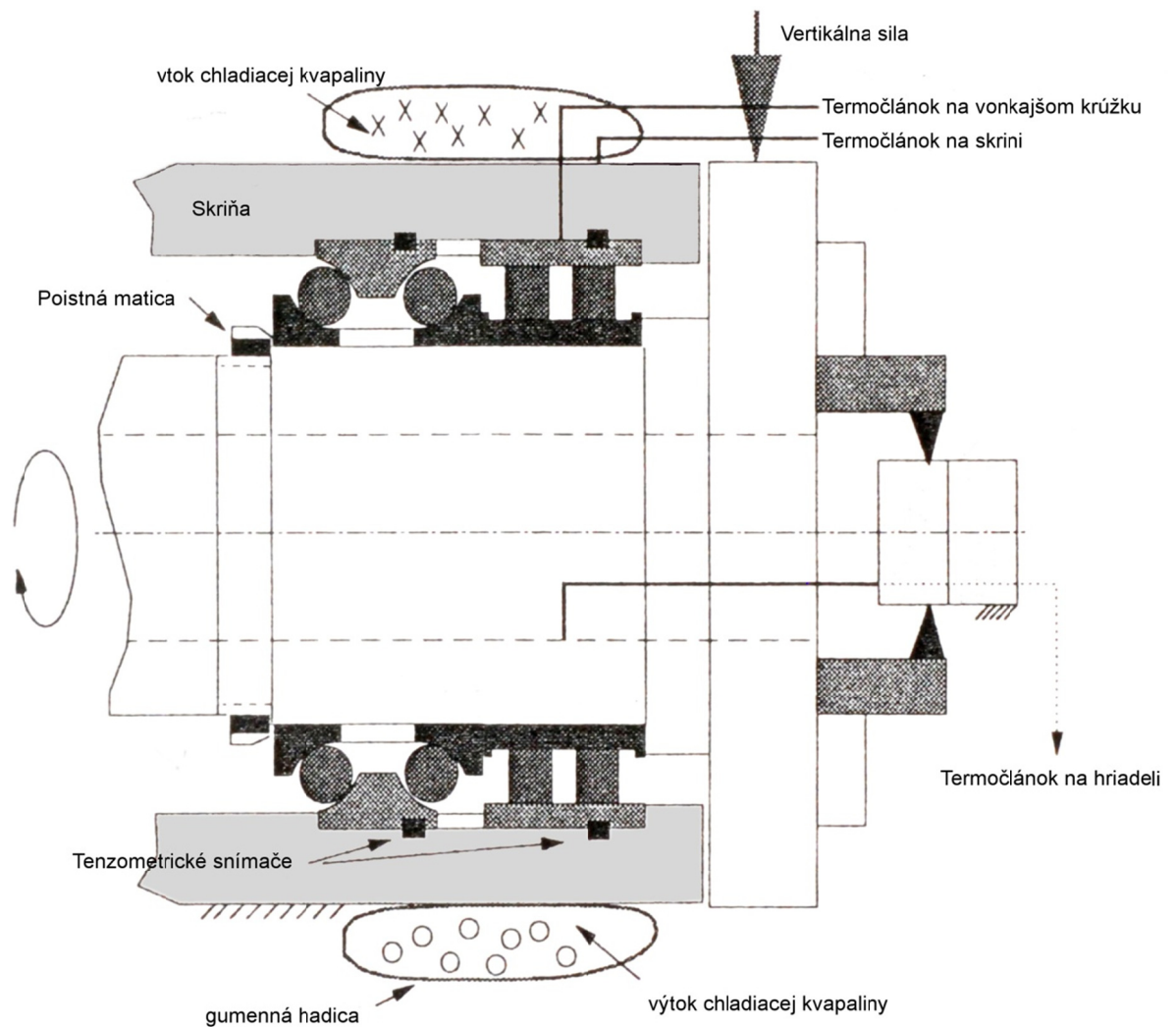
Obr. č. 10: Zmena vôle medzi guľôčkami a krúžkami ložiska [11]

Zmena vôle medzi guľôčkami a krúžkami ložiska je znázornená na obr. č. 10. Externé zaťaženie tiež môže ovplyvniť túto vôľu, a to v oboch smeroch. Záleží to na smere sily a na usporiadaní ložísk.

Silu vyvolanú tepelným predpätím dokážeme spočítať na základe Hertzianovho kontaktu.

$$F_t = k_t \cdot \epsilon_t^\beta \quad (5.3.)$$

kde k_t je radiálna elasticita ložiska, ϵ je veľkosť vôle na ložisku a β je 1,5 pre guľkové ložiská a 1,11 pre valčekové ložiská.



Obr. č. 11: Schéma tepelného predpätia [11]

Model, vytvorený Steinom a Tuom [11], popisuje zmeny tepelného predpätia v celom obrábacom stroji. Pozostáva zo štyroch častí: prenos tepla (predpovedá dynamické zmeny teploty na ložisku a popisuje tepelnú výmenu jeho častí), teplo vznikajúce trením (na základe informácií o rezných rýchlostiach, mazaní, predpätí a zaťažení sa snaží predpovedať správanie tepla na ložiskách), tepelnej rozťažnosti (zahŕňa všetky zmeny každého jedného ložiska v rozmeroch počas zmeny jeho teploty) a vplyv síl (nastavuje aplikované predpätie na základe zmeny vôle v ložisku medzi guľkami a krúžkami.). Na základe nameraných teplôt ložísk a ich častí, skrine, otáčok motoru, napätia, prúdu a teploty chladiacej/ohrievacej kvapaliny systém vyhodnocuje aktuálne predpätie a reguluje odchýlky.

Chladiaca, resp. ohrievacia kvapalina, preteká cez hadicu, ktorá je omotaná okolo skrine vretenovej jednotky. Kvapalina sa čerpá i zberá v zbernej nádobe. Teplota a prietok sú kontrolované.

Chladenie, resp. ohrievanie, sa aktivuje vtedy, ak sa teplota skrine zdvihne o 15°C [11] od okolitej. Teplota skrine klesne pomerne rýchlo, zatiaľ čo teplota vonkajšieho krúžku

a vretena poklesne len mierne. A následne, keď ochladzovanie vypneme, teplota skrine sa vráti na hodnotu teploty vonkajšieho krúžku v priebehu niekoľkých sekúnd

Výhody

Napriek tomu, že tepelné predpätie je veľmi citlivé na zmeny na vonkajšou krúžku ložiska alebo na skrini vretena, vhodnou a presnou reguláciou prietoku chladiacej kvapaliny dosiahneme stabilnejší chod a menej senzitivny na vonkajšie zaťaženie.

Nevýhody

Potreba chladenia kvapaliny a externej zbernej nádoby, čerpadlo.

5.5. Elektromagnet

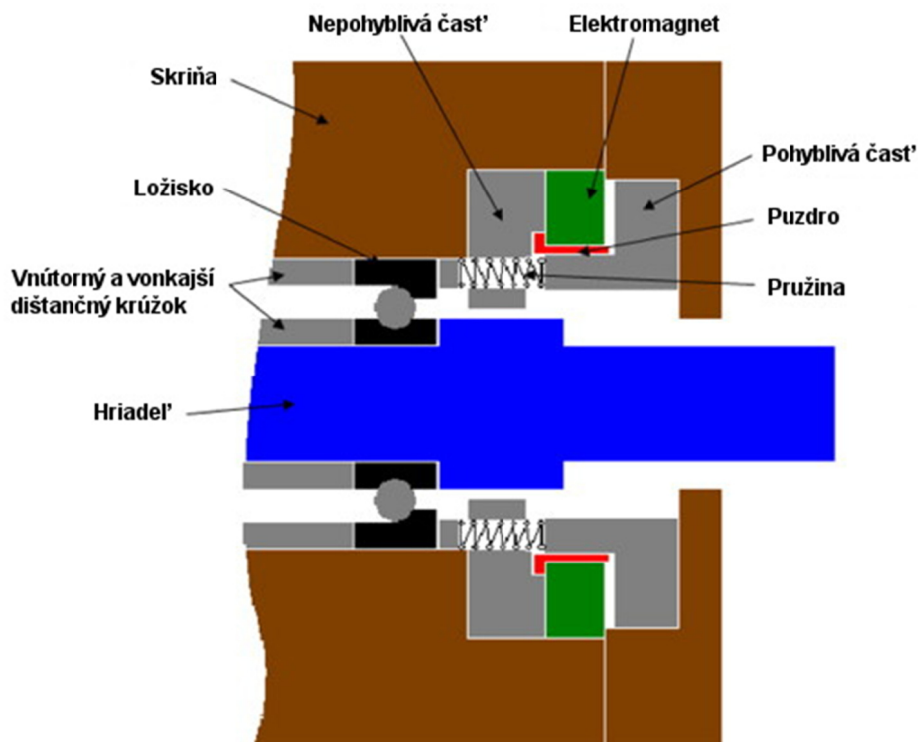
Feromagnetické prvky ako železo a nikel môžeme zmagnetizovať tak, že ich vložíme do indukčného magnetického poľa. Magnetickú silu môžeme vypočítať cez Maxwellovu metódu tenzometrického napätia [5].

$$F_{mag} = \frac{SB^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 SN^2 I^2}{8g^2} \quad (5.4.)$$

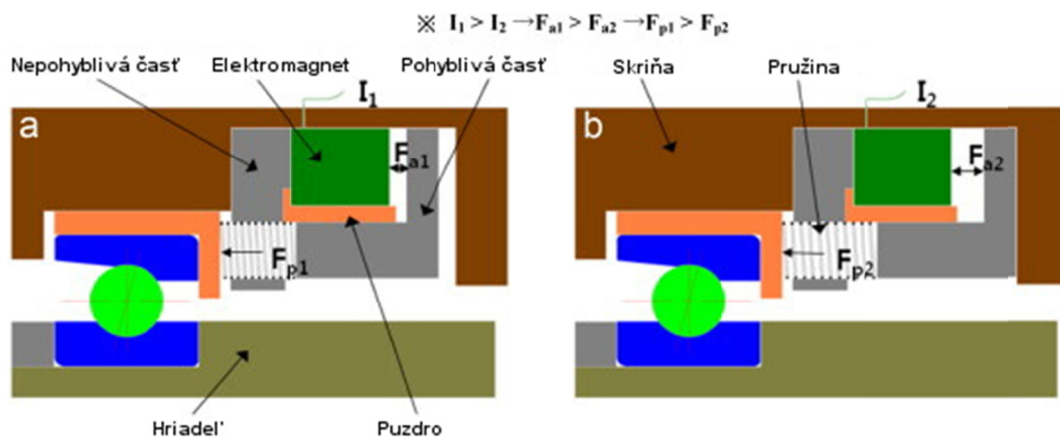
Kde B je magnetický tok v Tesloch, μ_0 je permeabilita vzduchu alebo vákua, S je plocha magnetického pólu, NI je amper-otáčky a g je šírka vzduchovej medzery.

Princíp

Na obr. č. 12 je schéma zariadenia [5] na reguláciu predpätia. Pozostáva z elektromagnetu, pohyblivej časti, ktorá je vyrobená z feromagnetického prvku a bude ovplyvňovať veľkosť predpätia, fixnej časti, puzdra, pružiny na vytvorenie počiatočného konštantného predpätia.



Obr. č. 12: Schéma predpätia riadeného elektromagnetom [5]



Obr. č. 13: Princíp riadenia predpätia [5]

Predpätie sa realizuje a nastavuje cez zmeny vo veľkosti magnetickej príťažlivosti medzi elektromagnetom a pohyblivým magnetickým prvkom v závislosti na veľkosti pretekajúceho prúdu v cievke ako ukazuje obr. č. 13.

I malá zmena v nastavení dokáže vyvolať veľké zmeny v pôsobiacej sile, pokiaľ vzdialenosť medzi elektromagnetom a magnetickým telesom je dostatočne malá. Avšak, presná kontrola pôsobiacej sily je náročnejšia [5].

Výhody

Žiadne oneskorenie pri zmenách nastavení.

Jednoduchá regulácia a veľmi dobrá presnosť.

Nevýhody

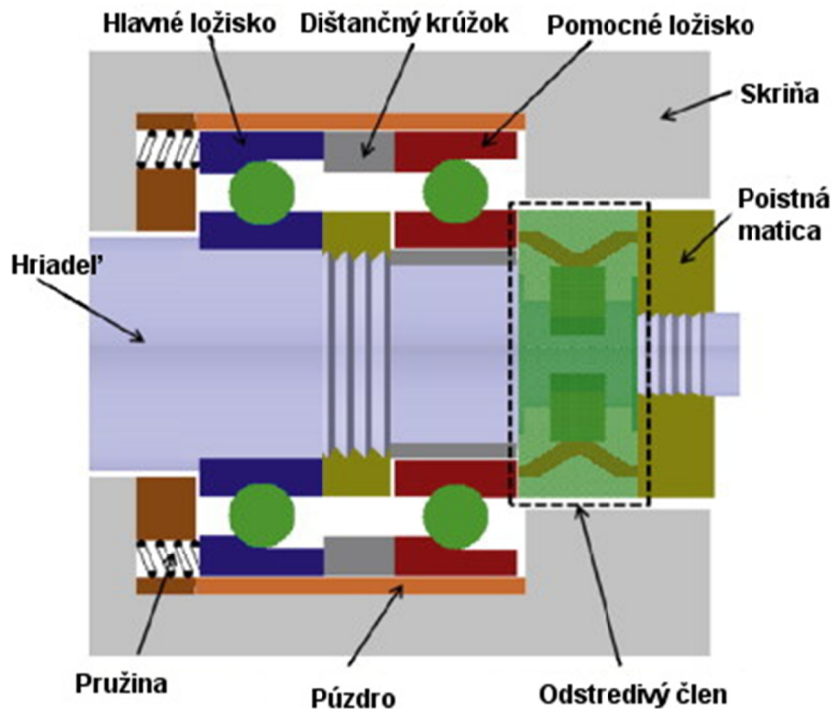
Magnetické pole magnetizuje celé okolie, nie len pohyblivé magnetické teleso. Treba zabrániť prieniku triesky a iných materiálov do vretenového systému. Prienik takéhoto materiálu by rapídne znížil životnosť ložísk a mohol spôsobiť poruchu. Preto je potrebná magnetická izolácia (hliníkový dištančný krúžok a iné nemagnetické časti, ktoré zabraňujú ovplyvňovaniu predpätia vyvolaného pružinou) [5]. Takisto vzniká magnetický prach.

Na to aby sa toto zariadenie mohlo využívať komerčne, je potrebné vytvoriť dostatočne malé a silné elektromagnety a použitie magnetickej izolácie.

5.6. Predpätie za využitia odstredivej sily

Usporiadanie ložísk v tomto prípade je vcelku odlišné od predchádzajúcich, pretože sa tu nachádza okrem hlavného ložiska, na ktoré pôsobí predpätie, jedno pomocné [4], ktoré prenáša silu a odstredivú zložku sily na silu pôsobiacu v axiálnom smere a pružinu pre vytvorenie konštantného počiatočného predpätia hlavného ložiska.

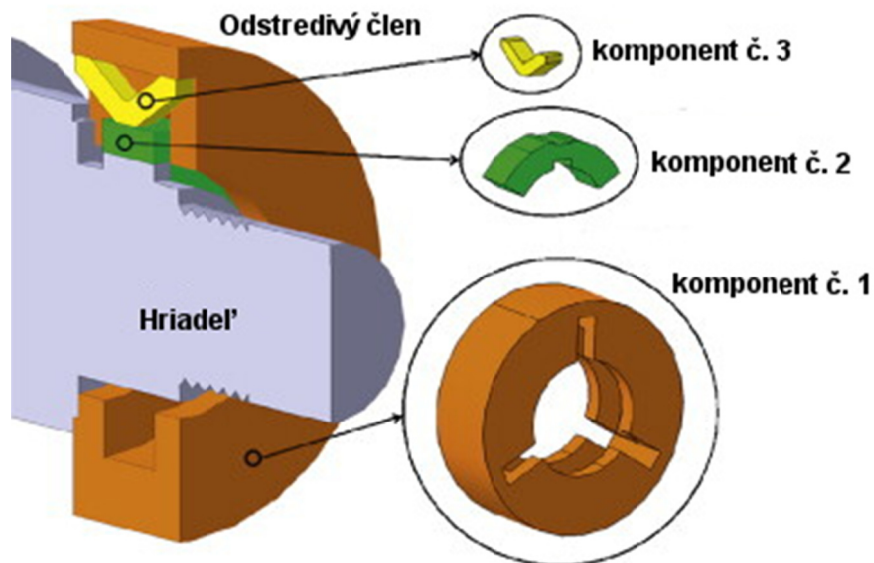
Na tento účel bolo vytvorené zariadenie [4], ktoré bude schopné pretransformovať odstredivú silu na automaticky regulované predpätie a správanie tohto zariadenia a rovnako aj priebeh predpätia boli otestované využitím kontaktnej nelineárnej analýzy.



Obr. č. 14: Schéma riadenia predpätia pomocou odstredivého člena [4]

Na obr. č. 14 je navrhnutý koncept tohto zariadenia. Pozostáva z matice, odstredivého člena, hlavného a pomocného ložiska, pružiny na vytvorenie konštantného počiatočného napätia. Konštantné počiatočné predpätie je vytvorené pružinou, ktorá pôsobí na vonkajší krúžok hlavného ložiska, a maticou. Akonáhle začne vreteno rotovať, odstredivý člen vytvára na základe odstredivej sily axiálne posunutie, čím tlačí skrz pomocné ložisko na vonkajší krúžok hlavného ložiska a redukuje tak predpätie. Inými slovami, odstredivá sila, ktorá vzniká rotáciou vretena je transformovaná na silu v axiálnom smere, ktorá znižuje počiatočné predpätie. Predpätie na ložisku je automaticky úmerne redukované nárastu/poklesu odstredivej sily. Pomocné ložisko prenáša axiálne posunutie z odstredivého člena na dištančný krúžok, ktorý prenáša túto silu na vonkajší krúžok hlavného ložiska [4].

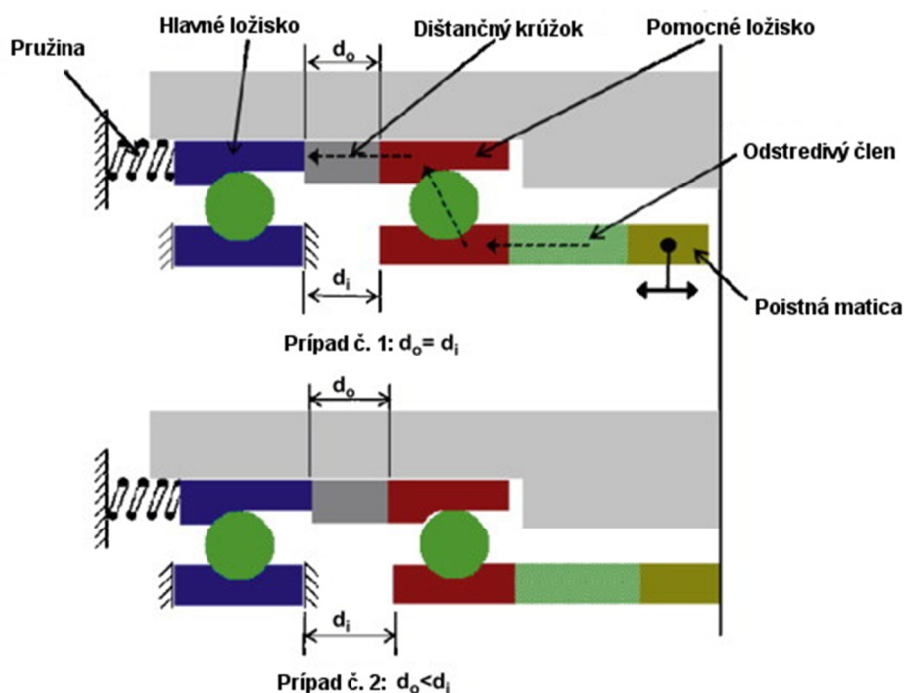
U pomocného ložiska musí byť zabezpečený voľný pohyb v axiálnom smere a nesmie u neho nastať žiadne predčasné poškodenie, takže musí mať omnoho dlhšiu životnosť ako je jeho minimálna vypočítaná životnosť.



Obr. č. 15: Princíp fungovania odstredivého člena [4]

Princíp

Na obr. č. 15 je detailný model odstredivého člena. Princíp spočíva v tom, že každá z troch častí má rôznu radiálnu expanziu, spôsobenú odstredivou silou, ktorú dokáže transformovať na expanziu v axiálnom smere. Ako už bolo spomenuté, skladá sa z troch častí, ktoré sú zložené do jedného celku, ktorý je upevnený na hriadieli. Všetky 3 časti rotujú rovnakou rýchlosťou ako hriadel'. Komponent č.1 je jednoduchý kus dutého valcovitého tvaru, ktorý má o dosť menšiu radiálnu expanziu ako komponent č. 2. Ten sa skladá z niekoľkých menších častí s väčšou radiálnou expanziou. Komponent č. 3 je stlačený medzi komponentmi 1 a 2 a roztáhuje sa v axiálnom smere [4]



Obr. č. 16: Princíp riadenia predpätia [4]

Výhody

Výrazne dokáže zredukovať financie na prevádzku, pretože nepotrebuje byť napájané elektricky a nepotrebuje mať prídavné zariadenie, ktoré by vytváralo hydraulický tlak.

Nevýhody

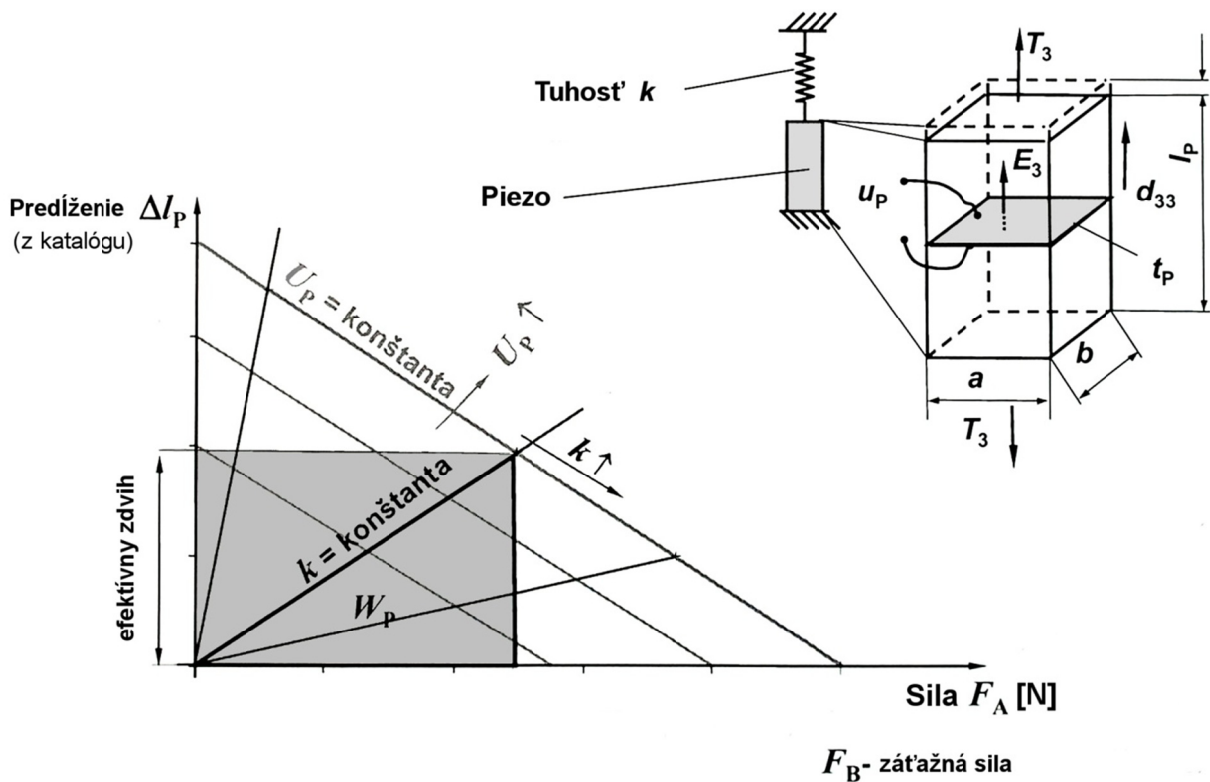
Veľkosť predpätia závisí od návrhu odstredivého člena a prevádzkových podmienok, počiatočného predpätia, dotiahnutia matice a použitých materiálov, pričom rozsah aplikovateľného predpätia nie je taký veľký. Zároveň je ťažké zmeniť a presne kontrolovať veľkosť predpätia pôsobiaceho na ložisko.

6. Praktická časť

Na základe porovnania rôznych spôsobov riadenia predpätia na guľkových ložiskách s kosouhlým stykom som sa rozhodol, že najvýhodnejší spôsob riadenia predpätia bude riadenie pomocou piezomodulu. Nakoľko sa javí ako ľahko riaditeľný, pomerne lacný a efektívny.

Riadenie pomocou elektromagnetu a pomocou odstredivého člena je pomerne náročnejšie, nakoľko elektromagnet ovplyvňuje všetky okolité feromagnetické časti stroja a vlastnosti odstredivého člena závisia od použitých materiálov, od počiatočného predpätia spôsobeného dotiahnutím matice a tuhosti pružiny.

Pri tvorbe modelu piezomodulu som vychádzal z [2,3,9,10] a parametre som čerpal zo stránok výrobcu [12].



Obr. č. 18: Charakteristika mechanickej práce piezoaktuátora

Model riadenia predpätia je značne zjednodušený. Nakoľko tu bola absencia reálneho stroja, z ktorého by sa dali získať potrebné údaje pre vytvorenie komplexnejšieho modelu, vychádzal som len z vedeckých publikácií. Vychádzal som z hodnôt, ktoré udáva výrobca ložísk [1] pre triedy predpätí. Na hrubé obrábanie som použil najväčšie predpätie a zaviedol som predpoklad, že axiálne posunutie vnútorného krúžku k vonkajšiemu musí byť za akýchkoľvek podmienok konštantné.

Vychádzal som z lineárnej rovnice piezoaktuátora [9]

$$\Delta l_p = s_{33}^E \cdot \frac{l_p}{A_p} \cdot F_s + d_{33} \cdot n_p \cdot u_p \quad (6.1.)$$

a uplatnil som zákon riadenia pre u_p

$$u_p = r_p \cdot \Delta l_p + r_i \int_0^t (l_{p,ref} - \Delta l_p) d\tau \quad (6.2.)$$

Riadenie bolo vykonané pomocou PI regulátoru v spätnoväzobnej vetve.

Toto riadenie je dostatočne rýchle a presné avšak bolo nutné použiť dva P regulátory, kvôli nutnosti zosilniť zložku I regulátora, pretože max. zosilnenie jedného členu je cca 10^6 a potrebné bolo 10^{10} .

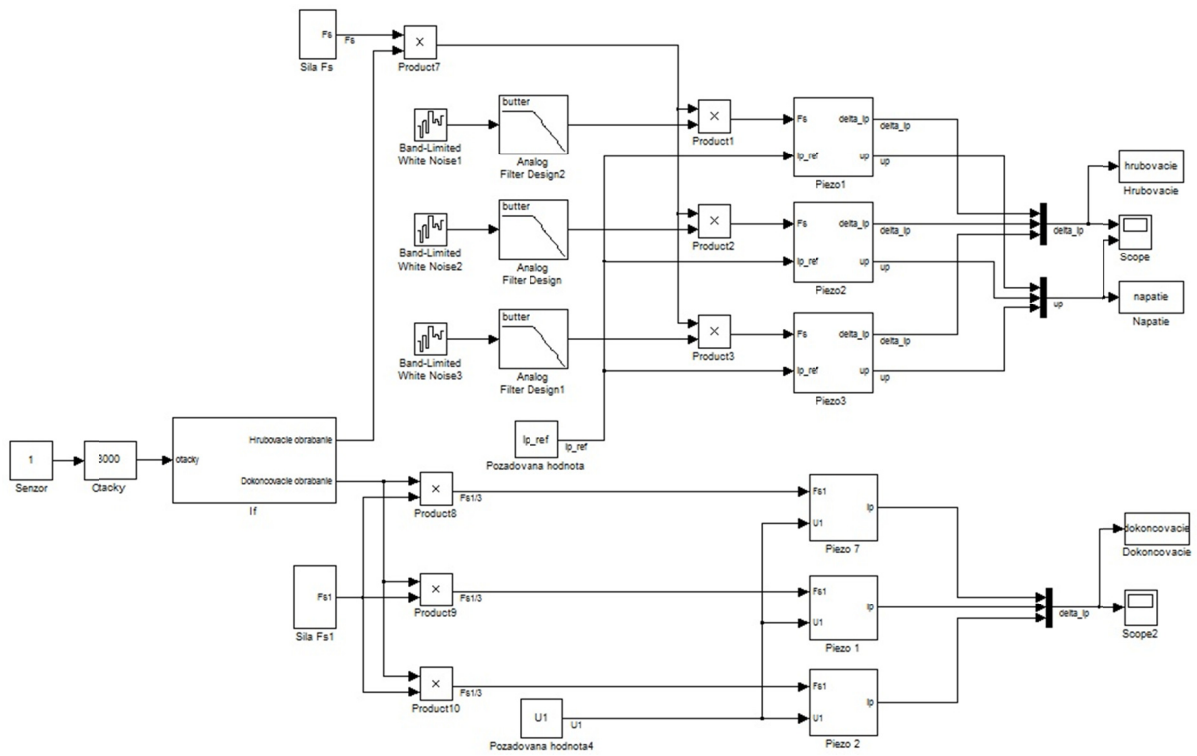
Na dosiahnutie reálneho riadenia bolo nutné použiť 3 piezomoduly už len kvôli tomu, že maximálne napätie, pri ktorom piezoaktuátor pracuje, je 1000 V a jeden piezomodul by nedokázal vyvolať dostatočne veľkú silu nato, aby udržal požadovanú výchylku pri hrubom obrábaní. Preto som rozložil pôsobiacu silu na tri piezomoduly. Teoreticky by bolo možné rozložiť ju i na dva piezomoduly, avšak nebolo by to efektívne riadenie.

Pre dokončovacie obrábanie som zaviedol predpoklad, že axiálne posunutie vnútorného krúžku k vonkajšiemu už nesmie byť udržiavané na konštantnej hodnote, ale musí byť možnosť vzájomného posunutia, aby sa vytvorila dostatočná vôľa medzi krúžkami na kompenzáciu deformácie spôsobenej odstredivou silou. Použitie zákona riadenia podľa (6.3) by malo zvýšiť tuhosť celého systému.

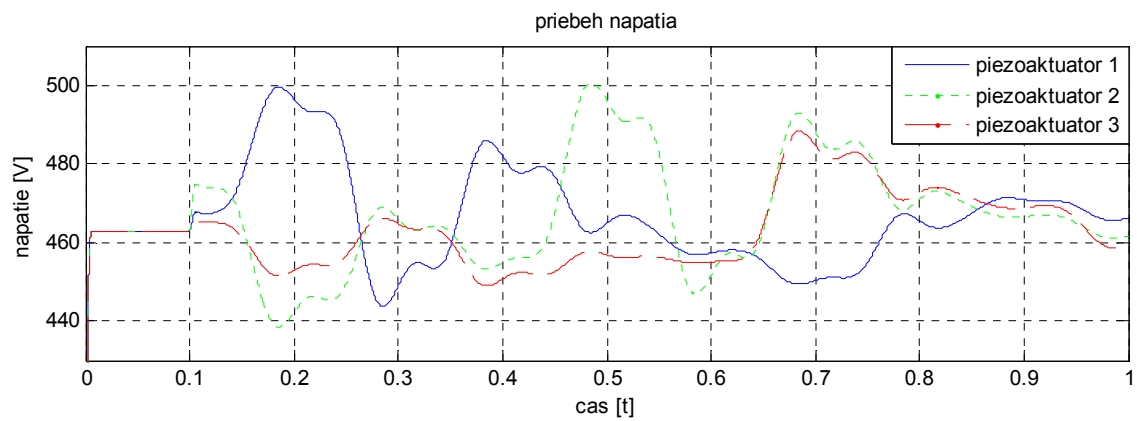
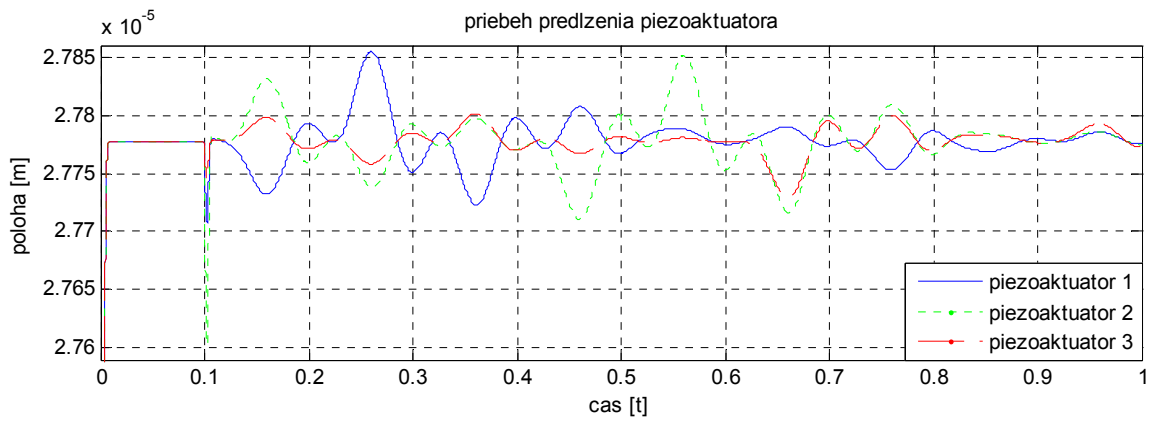
$$u_p = r_p \cdot \Delta l_p + r_i \int_0^t \Delta l_p d\tau \quad (6.3.)$$

Preto bol vytvorený model piezomodulu, ktorý sa bude správať rovnako ako pružina. Nastaví sa počiatková sila, aká býva pri malom predpätí a napätie sa nastaví tak, aby piezomodul dosiahol požadovanú výchylku. Ako náhle bude na piezomodul pôsobiť sila väčšia ako je zadané predpätie, bude sa správať ako pružina (jeho dĺžka sa bude skracovať).

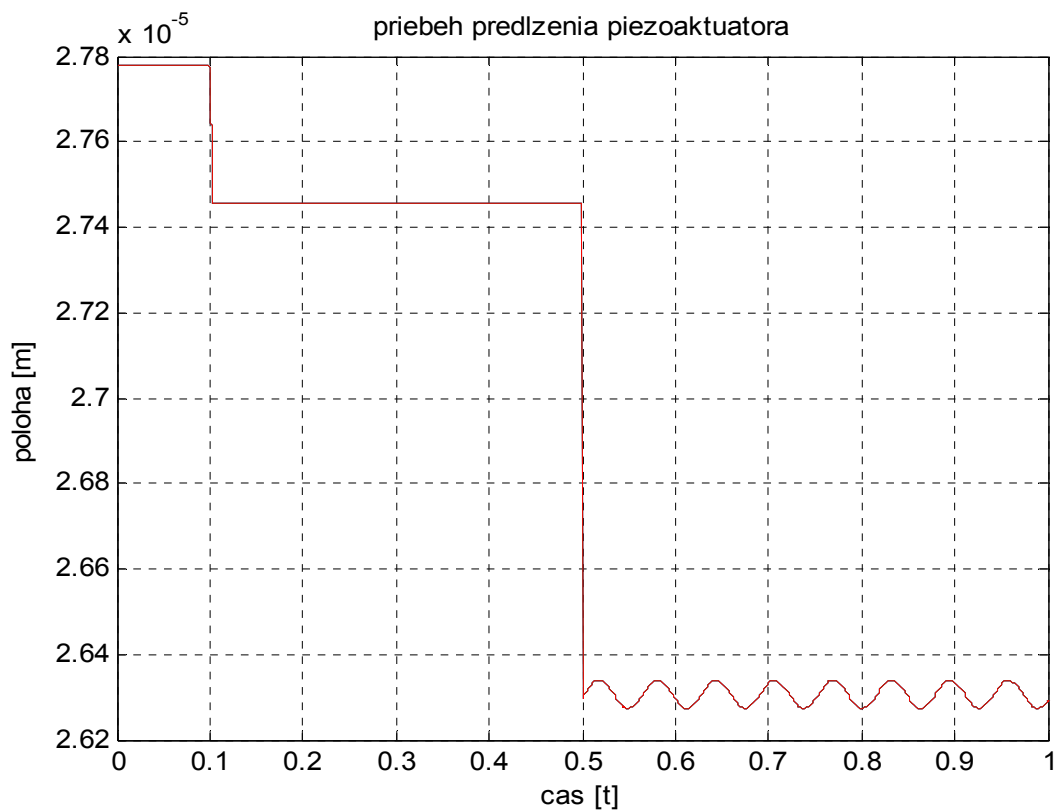
Tieto dva zákony riadenia (6.2. a 6.3.) sa budú prepínať príkazom if, na základe snímaných otáčok. Hraničná hodnota pre stanovenie hrubovacieho a dokončovacieho obrábania je stanovená na 4000 ot/min^{-1} [6]. Pri prekročení tejto hodnoty sa bude piezomodul správať ako pružina.



Obr. č. 19: Model riadenia predpätia pomocou 3 piezoaktuátorov



Obr. č. 20: Priebeh hrubovacieho obrábania



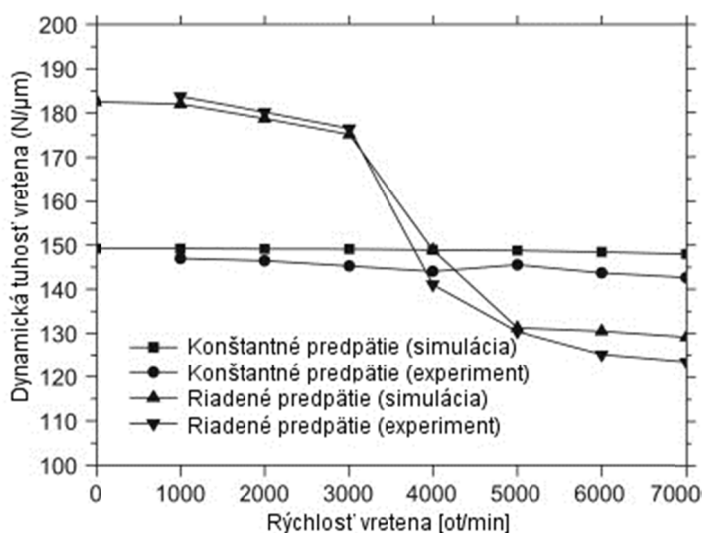
Obr. č. 21: Priebeh dokončovacieho obrábania

7. Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo porovnať rôzne druhy aktívneho riadenia predpätia na guľkových ložiskách s kosouhlým stykom v systémoch obrábacích strojov, kriticky ich zhodnotiť a následne vybrať jeden, ktorý sa zdal byť najvhodnejší.

Následne navrhnuť model a riadenie tohto predpätia v programe Matlab/Simulink a odladiť ho.

Na základe poznatkov, získaných z rôznych vedeckých publikácií, som dospel k názoru, že aktívne riadenie predpätia je vhodné pre hrubé obrábanie pri nízkych otáčkach, lebo zvyšuje celkovú tuhosť systému, a tým vznikajú vhodnejšie podmienky pre obrábacie procesy. Avšak, ako zistili v [6], pri vysokých otáčkach síce reguluje množstvo generovaného tepla na ložiskách, ale zároveň aj vcelku znižuje celkovú dynamickú tuhosť. To spôsobí horšie dosiahnuteľné podmienky pri dokončovacom obrábaní. Nakoľko tento článok vyšiel koncom roka 2010, a zatiaľ sa naň odkazuje len 5 iných článkov a nebol zreprodukovaný tento test, nie je dostatočne preukázateľné, že to je relevantný problém. Takže je na zvážení, či sa bude vykonávať hrubovacie a dokončovacie obrábanie na jednom stroji. Všetko závisí od požiadaviek, ktoré potrebujeme dosiahnuť.



Obr. č. 17: Závislosť otáčok na dynamickej tuhosti vretena [6]

Z dostupných variácií riadenia predpätia je zatiaľ najvhodnejšie riadenie pomocou piezomodulu, nakoľko je rýchly, riadi sa len napätím a dokáže vyvinúť veľkú silu. Riadenie predpätia pomocou elektromagnetu a odstredivého členu je zatiaľ vo vývoji a má ešte svoje „muchy“, takže nebolo možné ich dostatočne dobre zhodnotiť a navrhnuť. Je možné, že by nakoniec dosahovali lepšie výsledky ako vybraný piezoaktuátor.

V programe Matlab/Simulink bol navrhnutý značne zjednodušený model piezomodulu, ktorý bol riadený dvoma zákonmi riadenia. Predpokladal som, že axiálna sila, pôsobiaca v guľkovom ložisku s kosouhlým stykom, vyvolaná otáčkami, bude konštantná, čiže rýchlosť otáčok bude nemenná a ovplyvňovať túto silu budú len sily vyvolané obrábaním, ktoré pri splnení týchto podmienok budú budiť harmonické sily. Ďalší predpoklad bol, že charakter

správania sa piezoaktuátora bude lineárny a jeho maximálne napájacie napätie udávané výrobcom bolo 1000 V. Posledným predpokladom bolo, že pri hrubovacom obrábaní je nutné udržať konštantnú výchylku medzi vonkajším a vnútorným krúžkom a pri dokončovacom obrábaní, aby bola možnosť túto vôľu meniť na základe pôsobenia odstredivých síl. Ďalej som navrhol a simulačne overil riadiaci člen, ktorý realizuje prepínanie dvoch zákonov riadenia a zlepšuje správanie celej sústavy.

Cieľom ďalšieho výskumu v tejto oblasti by mohlo byť porovnanie pomeru cena/účinnosť, resp. obtiažnosť realizácie riadenia pre rôzne druhy predpätia. Ďalej odladenie simulácie na základe reálnych výsledkov, získaných z merania na skutočnom stroji a ich porovnanie.

Bibliografie

- Piceramic. (2011). Získáno 22. 05 2011, z Piceramic: <http://www.piceramic.com>
- SKF. (2011). Získáno 22. 05 2011, z SKF: <http://www.skf.com/portal/skf/home>
- Denkena, B., & Götz, T. (2004). Effect of preload control unit on Machine tool spindles. *Production Engineering 11/(2)*, stránky 175-178.
- Denkena, B., Goetz, T., & Li, J. (2002). Piezoelectric actuator with hydraulic transmission. *Annals of DAAAM for 2002 & Proceedings of 13th International DAAAM Symposium*, stránky 139-140.
- Hwang, Y. K., & Lee, C. M. (2009). Development of automatic variable preload device for spindle bearing by using centrifugal force. *International Journal of Machine Tools and Manufacture 49*, stránky 781-787.
- Hwang, Y. K., & Lee, C. M. (2010). Development of a newly structured variable preload control device for a spindle rolling bearing by using an electromagnet. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, stránky 253-259.
- Jiang, S., & Mao, H. (2010). Investigation of variable optimum preload for machine tool spindle. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, stránky 19-28.
- Li, H. L., & Shin, Y. C. (2004). Analysis of bearing configuration effects on high speed spindles using an integrated dynamic thermo-mechanical spindle model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture 44*, stránky 347-364.
- Lundberg, G., & Palmgren, A. (1947). Dynamic capacity of rolling bearings. V *Acta Polytechnica (7)*.
- Neugebaue, R., Wittstock, V., & Drossel, W. G. (2011). Werkzeugmaschinen-Mechatronik. *Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse*.
- Tönshoff, H. K., Denkena, B., & Götz, T. (2002). Piezoelectric actuator based preload control unit for machine tool spindles. *Production Engineering 9/(1)*, stránky 117-122.
- Tu, J. F., & Stein, J. L. (November 1996). Active thermal preload regulation for machine tool spindles with rolling element bearings. *Transactions American Society of Mechanical Engineers Journal*, stránky 499-505.

Zoznam použitých symbolov

- L_{10} – únavová životnosť [10^6 cyklov]
 X – súčiniteľ dynamického radiálneho zaťaženia [–]
 Y – súčiniteľ dynamického axiálneho zaťaženia [–]
 F_R – radiálne zaťaženie [N]
 F_A – axiálne zaťaženie [N]
 P_r – dynamické ekvivalentné zaťaženie [–]
 ε – parameter [–]
 n – otáčky [ot/min]
 F_t – tepelné predpätie [N]
 k_t – radiálna elasticita ložiska [Nm]
 ε – veľkosť vôle na ložisku [m]
 β – 1,5 pre guľkové ložiská a 1,11 pre valčekové ložiská [–]
 F_{mag} – magnetická sila [N]
 S – plocha magnetického pólu [mm^2]
 B – magnetický tok [T]
 μ_0 – permeabilita vzduchu alebo vákuu [Hm^{-1}]
 NI – ampér – otáčky [$\text{A} \cdot \text{ot/min}$]
 g – šírka vzduchovej medzery [m]
 F_s – sila pôsobiaca na piezoaktuátor [N]
 Δl_p – predĺženie piezoaktuátora
 d_{33} – deformačný koeficient piezo aktuátora [m/V]
 n_p – počet vrstiev piezo aktuátora [–]
 u_p – operačné napätie piezoaktuátora [V]
 s_{33}^E – elastický koeficient posunutia piezo aktuátora [m^2/N]
 l_p – dĺžka modulu piezoaktuátora [m]
 A_p – obsah prierezu piezoaktuátora kolmého na os posunutia [m^2]
 r_p – riadiaca zložka P regulátoru [–]
 r_i – riadiaca zložka I regulátoru [–]
 $l_{p,ref}$ – požadovaná hodnota vysunutia [m]

Prílohy

Obsah CD:

- elektronická forma bakalárskej práce (Aktivní řízení předpětí jednotek včetně obráběcích strojů.pdf)
- Simulačný model (Aktivne_riadenie_predpatia.mdl)
- Vstupné hodnoty (Vstupne_hodnoty.m)

(Simulačný model a vstupné hodnoty boli vytvorené v programe MATLAB R2010a 64-bit verzia 7.10.0.499, použitý operačný systém: Windows 7 64-bit)