



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

KONSTRUKCE VŘETENE FRÉZOVACÍHO STROJE

DESIGN OF MILLING MACHINE SPINDL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB BETLACH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BLECHA, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systému a robotiky

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Betlach

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce vřetene frézovacího stroje

v anglickém jazyce:

Design of milling machine spindle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede rešerši v oblasti vřeten frézovacích strojů. Na základě rešerše zvolí technické parametry konstruovaného vřetene. Provede potřebné konstrukční výpočty a vlastní konstrukci vřetene v 3D modelu.

Součástí bakalářské práce bude výkres sestavy vřetene a v elektronické příloze 3D model vřetene.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti frézovacích vřeten.

Určení technických parametru konstruovaného vřetene.

Potřebné konstrukční výpočty.

Konstrukční návrh vřetene v 3D modelu.

Výkres sestavy vřetene.

3D model vřetene.

Seznam odborné literatury:

Marek, J.; Konstrukce CNC obráběcích strojů, ISSN 1212-2572

Borský, V.; Obráběcí stroje, ISBN 80-214-0470-1

Borský, V.; Základy stavby obráběcích strojů, VUT Brno

www stránky výrobců obráběcích strojů

www.infozdroje.cz

www.mmspektrum.com

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

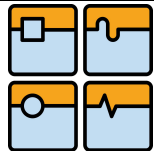
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 30.11.2011



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je konstrukce vřetene frézovacího stroje. První část práce obsahuje rešerši v oblasti konstrukčních součástí vřeten obráběcích strojů, které se používají v současné době. První část také obsahuje přehled výrobců obráběcích strojů a jejich frézek. Druhá část je zaměřena na vlastní konstrukci vřetene dle zvolených parametrů, včetně potřebných výpočtů. Součástí bakalářské práce je výkres sestavy vřetene a 3D model vytvořený pomocí programu Autodesk Inventor Professional 2011.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vřeteno, frézka, ložisko, elektrovřeteno, elektromotor, mazání, upínací systém.

ABSTRACT

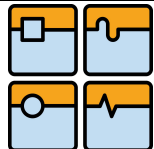
The aim of this bachelor's thesis is the construction of the milling machine spindle. The first part includes research in the structural part of machine-tools spindles that are used currently. The first section also contains an overview of producers of machine-tools and their milling machines. The second part is focused on the design of the spindle according to selected parameters, including the necessary calculations. This thesis also includes spindle assembly drawing and 3D model created with Autodesk Inventor Professional 2011.

KEYWORDS

Spindle, milling machine, bearing, electro spindle, electric motor, lubrication, clamping system.

Bibliografická citace

BETLACH, J. *Konstrukce vřetene frézovacího stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D..

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

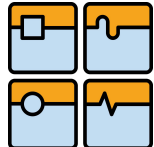
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Konstrukce včetně frézovacího stroje vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Blechy, Ph.D. a uvedl v seznamu všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 24.5. 2012.



Podpis autora

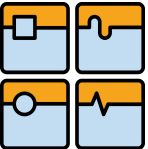
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval doc. Ing. Petru Blechovi, Ph.D. za rady a cenné připomínky, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

OBSAH

1.	ÚVOD	13
2.	VŘETENA OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	14
2.1	Úloha vřetene	14
2.2	Popis vřetene	14
2.3	Přesnost chodu vřetene	14
2.4	Konstrukce vřetene	15
2.5	Uložení vřetene	16
2.5.1	Typ ložiska a jeho uspořádání	16
2.5.2	Rozměr ložiska	18
2.5.3	Předpětí ložiska	19
2.5.4	Mazání vřetenových ložisek	19
2.6	Těsnění vřetene	21
2.7	Náhon vřetene	22
2.8	Tepelné vlastnosti vřeten	22
3.	UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ	23
4.	PŘEHLED VŘETEN VYBRANÝCH FRÉZOVACÍCH STROJŮ	26
4.1	Kovosvit MAS, a.s.	26
4.2	Tajmac – ZPS, a.s.	27
4.3	TOS Olomouc, s.r.o.	28
4.4	Haas Automation, Inc.	29
5.	TECHNICKÉ PARAMETRY A VÝPOČET VŘETENE	30
5.1	Stanovení řezných podmínek frézování	30
5.2	Výpočet maximálních otáček vřetene	31
5.3	Výpočet krouticího momentu	32
5.4	Volba pohonu vřetene	33
5.5	Volba upínání nástroje	34
5.6	Předběžné určení rozměrů vřetene	36
5.6.1	Předběžná volba ložisek	37
5.6.2	Tuhost vřetene	38
5.6.3	Výpočet trvanlivosti ložisek	41
5.6.4	Kontrola pevnosti vřetene	45
6.	KONSTRUKCE VŘETENE	47
7.	ZÁVĚR	48

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 12
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

8.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
9.	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	52
10.	SEZNAM OBRÁZKŮ	53
11.	SEZNAM TABULEK	54
12.	SEZNAM PŘÍLOH	55

1. ÚVOD

Obrábění je technologický proces, při kterém je ostrým řezného nástroje odebírána z obrobku přebytečná část materiálu v podobě třísky. Obrábění se uskutečňuje v soustavě STROJ – NÁSTROJ – OBROBEK.

Rozdělení obrábění podle hlavního řezného pohybu:

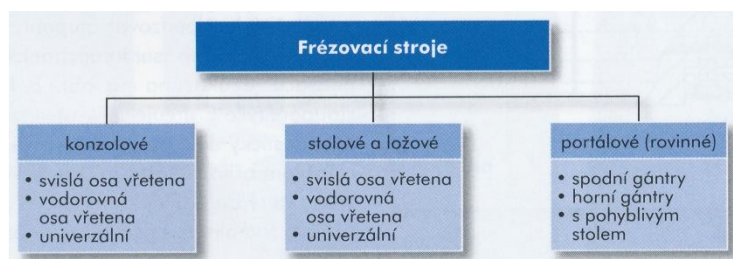
- obrobek koná rotační pohyb (soustružení)*
- nástroj koná rotační pohyb (frézování, vrtání, broušení, ...)*
- obrobek koná přímočarý vratný pohyb (hoblování)*
- nástroj koná přímočarý vratný pohyb (protahování, protlačování, obrážení)*

V dnešní době jsou na moderní obráběcí stroje kladeny vysoké požadavky na přesnost a rychlost obrábění. Obráběcí stroje mají několik celků, které ovlivňují přesnost a rychlost výroby.

- Polohování nástroje (obrobku)* - požadujeme vysokou tuhost rámu, odolnost stroje vůči chvění, dostatečný odvod třísek, dostatečně silnou posuvovou soustavu a plynulý pohyb nástroje i obrobku
- Vřeten s vřeteníkem* - požadujeme maximálně tuhé uložení, teplotní stabilitu, spolehlivé upínání a přívod chladicí kapaliny, zajištění potřebného výkonu, rychlé zabrzdění a reverzace otáčení
- Zásobník nástrojů* - požadujeme spolehlivou výměnu nástrojů v co nejkratším čase, dostatečnou kapacitu zásobníku a jednoduchou konstrukci
- Zásobník obrobků* - možnost přesného upnutí na paletu a co nejrychlejší výměnu palet

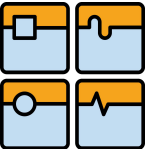
Frézování

Mezi nejrozšířenější a nejvýkonnější obráběcí stroje patří stroje frézovací. Jsou určeny nejen pro obrábění rovinných ploch, ale i zakřivených drážek, závitů, zubů ozubených kol apod. [1]



Obr. 1.1 Rozdělení frézovacích strojů [1]

Frézovací stroj má několik důležitých částí, které přímo ovlivňují kvalitu a přesnost výroby. Mezi tyto části patří rám s vodicími plochami, stůl, vřeten s vřeteníkem, posuvová soustava, náhon vřetena, apod.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 14
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

2. VŘETENA OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

2.1 Úloha vřetene

Úlohou vřetene je zaručit obrobku (u soustruhů) nebo nástroji (u frézek, vrtaček, brusek) přesný otáčivý pohyb, tj. takový, při němž se dráhy jednotlivých bodů obrobků nebo nástrojů liší od kružnice jen v přípustných mezích. Funkce vřetena je zde shodná s funkcí kruhového vedení a vřeteno se od něho liší pouze tvarem. [1]

2.2 Popis vřetene

Konec vřetena, který vyčnívá z vřeteníku, nazýváme přední konec. Tento konec je tvarově přizpůsoben pro uchycení obrobku nebo nástroje. Úprava konce vřetene je normalizována nebo typizována podle druhu stroje. Vřetena obráběcích strojů jsou většinou uložena pomocí valivých ložisek. Aby bylo vřeteno staticky uloženo, je nutné ho zajistit jak radiálním směru, tak i v axiálním směru. Ložisko, které se nachází blíže k přednímu konci vřetene, nazýváme hlavní (přední).

2.3 Přesnost chodu vřetene

Z důvodu přesnosti obráběcího stroje, jsou na vřeteno kladeny náročné požadavky, mezi které patří.

- přesnost chodu
- dokonalé vedení (nemění polohu v prostoru)
- co nejmenší ztráty v uložení vřetene
- dostatečná tuhost (předeprnutí)
- možnost vymezení vůlí vzniklých opotřebením
- provozní spolehlivost a dlouhá životnost

Přesnost chodu sklíčidla na té části, která ovlivňuje házení obrobku či nástroje (upínací kužel, plocha pro upevnění upínací desky či sklíčidla).

Radiální házení sklíčidla je zapříčiněno:

- házením jednoho nebo více ložisek
- nesouosostí kontrolované plochy vřetene s osou otáčení
- neokrouhlým tvarem kontrolované plochy vřetene

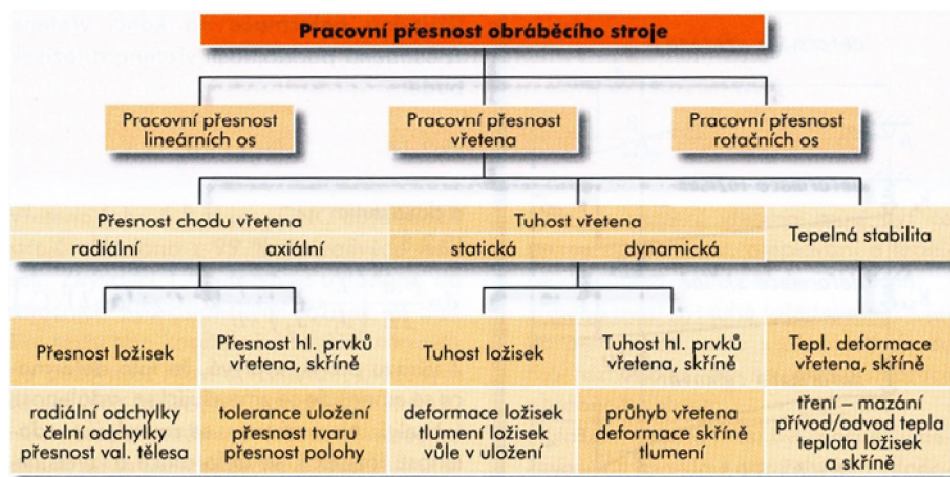
Radiální házení předního konce vřetene lze upravit, vhodnou volbou uložení a typu ložisek.

Axiální házení sklíčidla je zapříčiněno:

- axiálním házením ložiska
- nedokonalou kolmostí čelní plochy k ose otáčení

Axiální házení lze z části eliminovat obrobením dané plochy po montáži přímo na stroji.

Pracovní přesnost obráběcího stroje, je určena zejména pracovní přesností vřetene tzn. - radiální a axiální přesností chodu, statickou i dynamickou tuhostí, teplotní roztažností, atd. Následující obrázek naznačuje několik vlivů ovlivňujících přesnost chodu vřetene.



Obr. 2.1 Vlivy na pracovní přesnost obráběcího stroje [1]

2.4 Konstrukce vřetene

Konstrukci vřeten můžeme rozdělit na dva typy, podle tvaru a způsobu zástavby do vřeteníku stroje. Proto rozlišujeme zástavbu vřetene do tělesa tvaru kváдру „SKŘÍNĚ“ a do tělesa rotačního tvaru „TUBUSU“.



Obr. 2.2 Druhy zástavby vřetene: a) tubus, b) skříň [8]

2.5 Uložení vřetene

Při volbě valivého uložení bychom měli dodržet postup, který je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 2.2 Etapy návrhu uložení vřetene [1]

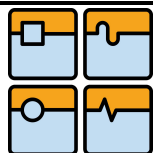
2.5.1 Typ ložiska a jeho uspořádání

Při valivém uložení vřetene hraje důležitou roli tuhost hřídele, ze které určíme průměry částí hřídele a ložisek. Druhy ložisek jsou na obr. 2.3. Při volbě typu ložiska jsme limitováni těmito faktory:

- velikost zástavbového prostoru
- provozní otáčky
- přesnost uložení
- způsob mazání
- zatížení od řezných sil
- požadovaná tuhost a přesnost chodu

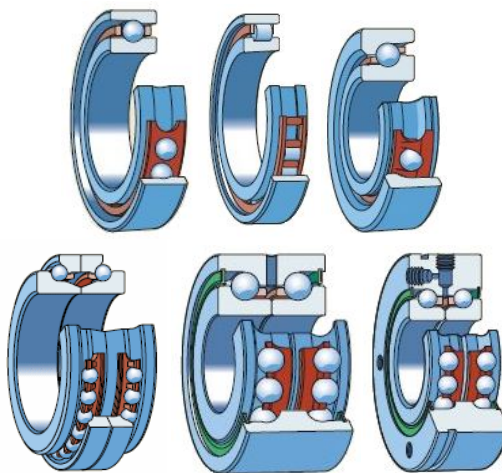
Ložiska jsou vyráběna jako celoocelová nebo hybridní. U hybridních ložisek jsou valivé členy vyrobeny z keramiky. Klece hybridních ložisek jsou také vyráběna z různých materiálů např. (polyamid, pryskyřice, apod.). Výhodami hybridních ložisek jsou:

- Větší tuhost
- Možnost dosažení vyšších otáček (menší hmotnost valivých členů)
- Menší tepelná vodivost
- Odolnost proti korozi, atd.

Porovnání materiálových vlastností ložiskové ocele a nitridu křemíku

Tab. 2.1 Porovnání vlastností ložiskové ocele a nitridu křemíku [3]

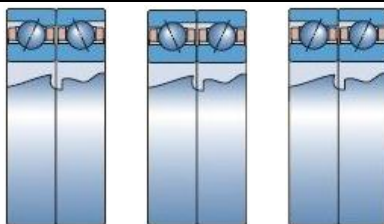
Vlastnosti materiálu	Ložisková ocel	Ložiskový nitrid křemíku
Mechanické vlastnosti		
Měrná hmotnost [g/cm^3]	7,9	3,2
Tvrdost	700 HV10	1 600 HV10
Modul pružnosti [kN/mm^2]	210	310
Tepelná roztažnost [$10^{-6}/\text{K}$]	12	3
Elektrické vlastnosti (při 1 MHz)		
Elektrický odpor [Ωm]	$0,4 \times 10^{-6}$ (vodič)	1012 (izolátor)
Dielektrická pevnost [kV/mm]	-	15
Relativní permitivita	-	8



Obr. 2.3 Typy vysoce přesných ložisek SKF – SNFA [3]

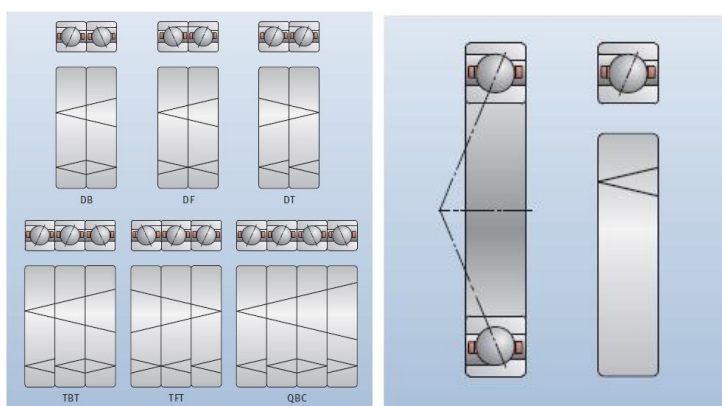
Základní skupiny uspořádání ložisek:

- uložení s dvouřadým válečkovým ložiskem
- uložení v kuželíkových ložiskách
- uložení v ložiskách s kosoúhlým stykem:
 - a) uspořádání do „O“
 - b) uspořádání do „X“
 - c) uspořádání v tandemu



Obr. 2.4 Uspořádání ložisek do a) „O“, b) „X“, c) „T“ tandemu [3]

Ložiska mohou být uspořádána v sadách. Možnosti těchto uspořádání jsou znázorněny na obrázku 2.5. Tato ložiska jsou většinou předem spárována výrobcem a jsou před označena pro montáž.



Obr. 2.5 Příklady ložiskových sad FAG a jejich označení [4]

2.5.2 Rozměr ložiska

Rozměr ložiska je určen velikostí přenášeného zatížení, životností (trvanlivostí), zástavbovým prostorem (velikostí vřeteníku). Jelikož ložiska musí přenášet radioaxiální kombinované zatížení, musíme provést přepočet zatížení na ekvivalentní dynamické zatížení:

$$P = X \cdot F_R + Y \cdot F_A$$

F_R – radiální síla

F_A – axiální síla

X – radiální koeficient

Y – axiální koeficient

Koeficienty X a Y jsou závislé na poměru axiální a radiální síly. Tyto koeficienty jsou stanoveny výrobcem pro každé ložisko.

Pro výpočet životnosti ložiska se užívá vztah:

$$L_h = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n_m} \text{ [h]}$$

P – ekvivalentní dynamické zatížení [N]

C – dynamická únosnost ložiska [N]
 p – mocnitel
 $p = 3$, pro kuličková ložiska
 $p = 10/3$, pro válečková ložiska
 n_m – střední otáčky ložiska [min^{-1}]

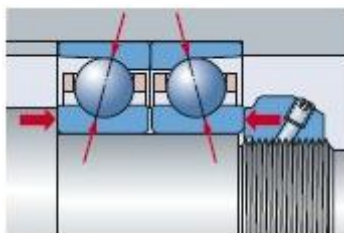
2.5.3 Předpětí ložiska

Předpínací síla, je síla, působící mezi valivými členy a není způsobena vnějším zatížením. Tato síla je způsobena posunutím jednoho ložiskového kroužku vůči druhému při montáži. Důvody pro vytvoření předpětí jsou následující:

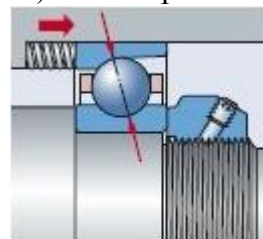
- zvýšení tuhosti
- zvýšení přesnosti vedení hřídele
- snížení úrovně hluku
- delší provozní trvanlivost
- zatížení při vysokých otáčkách

Příklady možností vyvolání předpětí jsou na následujících obrázcích.

a) Posunutím kroužků vůči sobě



b) Pomocí pružin



Obr. 2.6 Možnosti vyvolání předpětí v ložisku s kosoúhlým stykem [3]

2.5.4 Mazání vřetenových ložisek

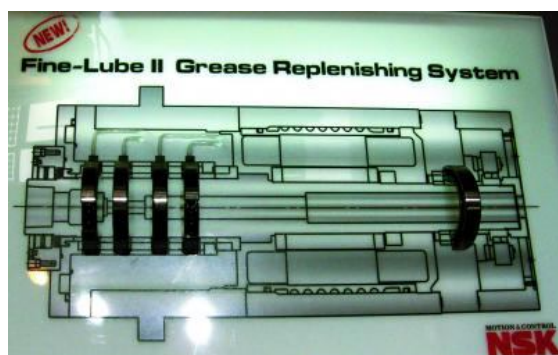
Ložiska mažeme z důvodu snížení opotřebení působením valivých členů na vnější kroužky ložiska. Účinné mazání prodlužuje životnost ložisek. Volba správného maziva a způsobu mazání ložisek, závisí nejen na provozních podmínkách (otáčky, teplota, přesnost chodu, apod.), ale je ovlivněna i způsobem mazání souvisejících částí například ozubených kol.

Pro vytvoření účinného filmu maziva mezi valivými členy a kroužky ložiska, stačí pouze malé množství maziva. Z tohoto důvodu můžeme pro mazání ložisek využít i plastických maziv, které mají malou hodnotu dynamického tření. Při vysokých otáčkách je vhodnější ložisko mazat olejem, jelikož plastické mazivo v těchto podmínkách nemá dostatečně dlouhou životnost. Olej navíc pomáhá chladit ložisko.

Mazání pomocí plastického maziva

Mazání přesných vřetenových ložisek pomocí plastickým mazivem umožňuje běh ve velkém rozsahu otáček bez výrazného zvýšení teploty. Použití plastického maziva také zjednodušuje uložení ložisek, z důvodu snazšího udržení maziva v ložisku oproti oleji. Plastické mazivo také zabraňuje vnikání cizích částic do ložiska.

Plastické mazivo dodáváme do ložiska jednorázově při montáži nebo pomocí patron. Moderní způsob je domazávání ložisek pomocí mazacích jednotek.



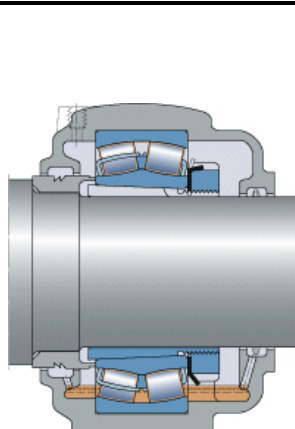
Obr. 2.7 Mazací systémy firem: a) NSK b) SKF-Vogel [5]

Mazání pomocí oleje

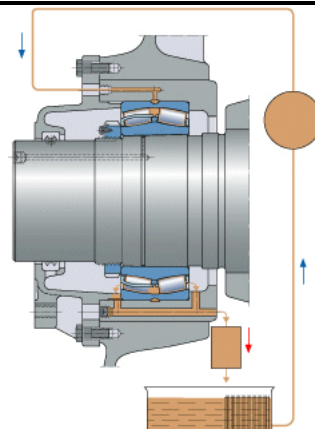
Při mazání olejem může být přívod oleje upraven podle provozních podmínek. Proto vyhovuje mnoha aplikacím, hlavně však tam, kde potřebujeme odvádět teplo z důvodu vysokých otáček. Některé způsoby mazání olejem jsou:

- olejovou lázní (broděním)
- mazání s nuceným oběhem oleje
- kapací mazání
- mazání vstřikovaným olejem
- mazání olejovou mlhou
- mazání olej-vzduch

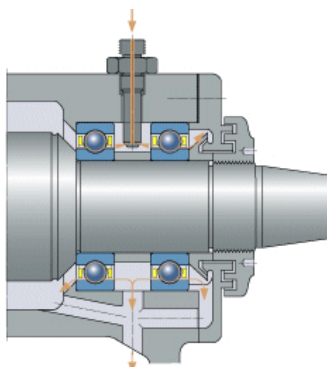
Na obrázku 2.8 jsou některé z těchto způsobů mazání vyobrazeny.



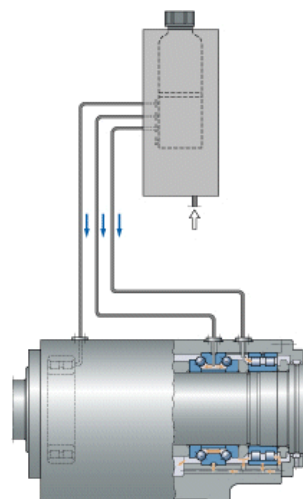
a) olejová lázeň (brodění)



b) Mazání s nuceným oběhem



c) mazání vstřikováním oleje



d) mazání olej vzduch

Obr. 2.8 Příklady způsobů mazání ložisek olejem [3]

2.6 Těsnění vřetene

Úlohou vřetenového těsnění je utěsnění mezery mezi pohyblivou a nepohyblivou částí vřetene. Tuto mezeru utěsňujeme zejména z těchto důvodů:

- Zadržení maziva
- Zabránění vnikání nečistot
- Oddělení dvou různých médií

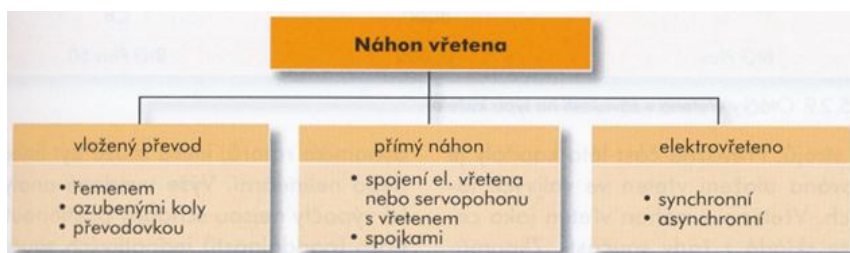
Mají-li být hřídelová těsnění účinná, musí mít minimální tření a malou míru opotřebení i za nepříznivých podmínek. Těsnění dále rozdělujeme na kontaktní a bezkontaktní.

Za kontaktní těsnění pokládáme V-kroužky a gufera různých tvarů.

Za bezkontaktní těsnění pokládáme tlakový vzduch, který vháníme do labyrintu. Tento způsob je velice účinný, jelikož nedochází ke tření, avšak je náročnější na výrobu.

2.7 Náhon vřetene

„Rolí pohonů a převodových soustav obráběcích strojů je přeměnit a přenést elektrickou energii tak, aby mohlo probíhat vlastní Obrábění. Proto je nutné použít mnoho konstrukčních prvků, mezi které patří motory, převodovky, spojky, atd.“ [2]



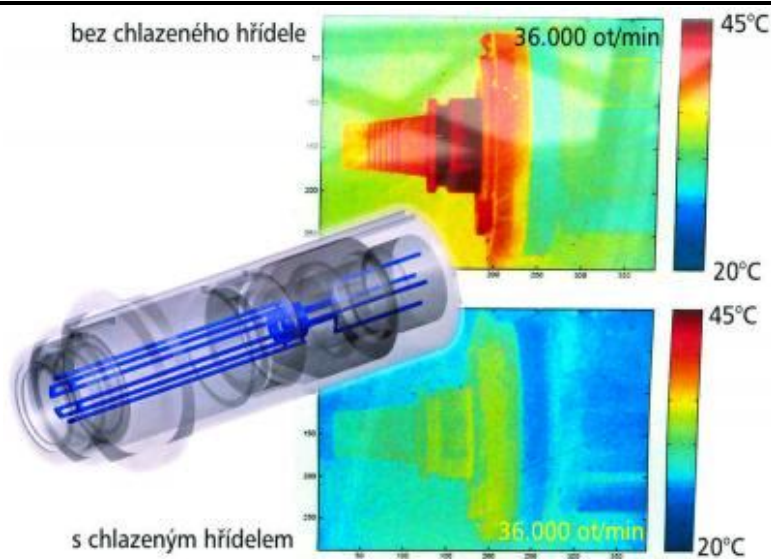
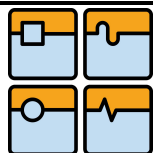
Obr. 2.9 Druhy náhonů vřetene [1]



Obr 2.10 Náhon vřetene: a) řemenem, b) přímý, c) ozubenými koly [7]

2.8 Tepelné vlastnosti vřeten

Elektromotor a vřetenová ložiska představují zdroje tepla, které nepříznivě ovlivňují přesný chod vřetene působením tepla. Z důvodu špatné přístupnosti vřetene je většinou chlazen pouze stator motoru a vřeteník. V důsledku teplotní roztažnosti se však mimo jiné zvětšují i ložiska, která jsou chlazením vřeteníku a rozpínáním vřetene dodatečně namáhána. Proto je z důvodu přesnosti výroby a zabránění zadírání ložisek snaha vyrábět vodou nebo vzduchem chlazené vřetenové hřídele.



Obr. 2.11 Vřeteno Fischer MFW-1412/36/20 s chlazenou hřídelí [6]



Obr. 2.12 Vřeteno a motor chlazené vzduchem [7]

3. UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ

Pro upínání nástrojů do vřeten se využívá normalizovaných tvarů upínacích ploch. Nástroje upínáme do dutiny vřetene. Tato dutina je obvykle tvořena kuželovou plochou. Může však mít i různé jiné speciální tvary, které vyvíjejí firmy zabývající se výrobou nástrojů (nástrojových soustav).

Při obrábění nerotačních ploch, využíváme stavebnicové nástrojové soustavy. Tyto soustavy se skládají z nástrojového držáku, prodlužovacího mezikusu (nástavce) a nástrojové jednotky.



Obr. 3.0 Nástrojová soustava firmy Sandvik Coromat [25]

Rozeznáváme následující tvary nástrojových držáků:

- kuželová stopka ISO (kuželovitost 7:24)
- kuželová stopka HSK (kuželovitost 1:10)
- válcová stopka
- BIG Plus (jako ISO, ale sedí i na čele)
- speciální tvar profilu (např. trojúhelníkový Sandvik Coromat Capto)



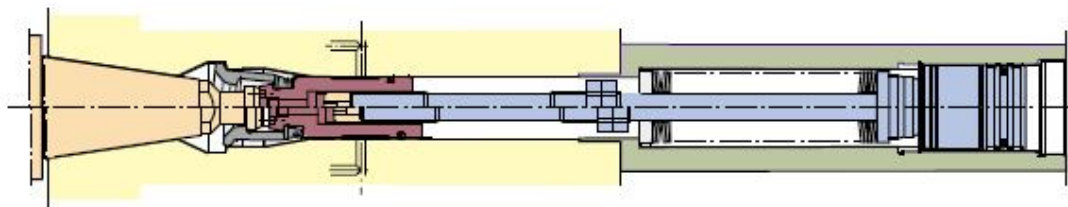
Obr. 3.1 Nástrojové držáky:

a) ISO [21], b) HSK [22], c) Sandvik Coromat Capto [23], d) BIG Plus [24]

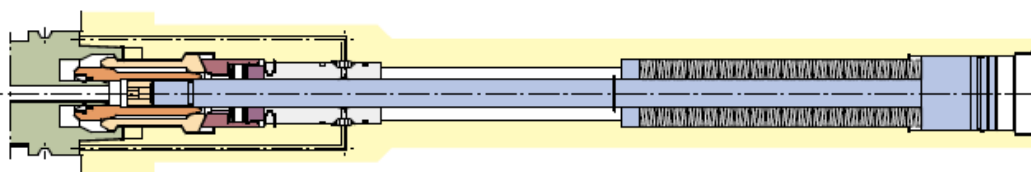
Základní rozdíly mezi ISO a HSK. ISO stopka má mezi čelem vřetene a stopkou vůli, na rozdíl od HSK stopky.

ISO kužel je upínán svazkem talířových pružin, které vtahují nástroj do vřetene pomocí upínacího šroubu, který je našroubován do zadní části nástrojového držáku.

HSK kužel je upínán za vnitřní dutinu talířovými pružinami. Hlavní výhodou upínání za vnitřní dutinu je, že odstředivé síly působící na upínač působí ve vhodném směru. Proto se, se zvyšujícími otáčkami zlepšuje upnutí nástrojového držáku.



Obr. 3.2 Upínání ISO kužele OTT-Jakob [30]



Obr. 3.3 Upínání HSK kužele OTT-Jakob [30]

Vhodnost použití různých typů upínacích kuželů na otáčkách vřetene udává následující tabulka.

Tab. 3.0 Typ kužele podle otáček vřetene

Typ kužele	Otáčky vřetene [min^{-1}]	Poznámka
ISO	10 000	ISO 40
	8 000	ISO 50
HSK	24 000	HSK 63
	15 000	HSK 100
Sandvik Coromat Capto	11 000	C6
	8 000	C8
BIG Plus	11 000	BIG Plus 50

4. PŘEHLED VŘETEN VYBRANÝCH FRÉZOVACÍCH STROJŮ

4.1 Kovosvit MAS, a.s.

Tab. 4.0 Parametry vřeten stroje MCV 750 [9]

Obráběcí centrum MCV 750				
Vřeteno		SPEED	SPRINT	RAPID
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	18 000	18 000	24 000
Výkon motoru vřetene (S1/S6 40%)	[kW]	33/45	25/35	19/26,7
Krouticí moment (S1/S6 40%)	[Nm]	157/215	88/130	60/86
Upínací kužel		HSK – A63 (ISO 40)	ISO 40, HSK – A63	HSK - 63

Tab. 4.1 Parametry vřeten stroje MCU 630V - 5X [10]

Obráběcí centrum MCU 630V - 5X			
Vřeteno		POWER	SPRINT
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	10 000	18 000
Výkon motoru vřetene (S1/S6 40%)	[kW]	20/26	25/35
Krouticí moment (S1/S6 40%)	[Nm]	262/340	87/130
Upínací kužel		ISO 50	HSK – A63



Obr. 4.0 Obráběcí centra: a) MCV 750 [9], b) MCU 630V – 5X [10]

4.2 Tajmac – ZPS, a.s.

Tab. 4.2 Parametry vřeten stroje MCFV 1050 [11]

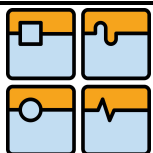
Obráběcí centrum MCFV 1050			
Pohony		SIEMENS	FANUC
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	10 000	10 000
Výkon motoru vřetene	[kW]	17	26
Krouticí moment	[Nm]	127	115
Upínací kužel		ISO 40	ISO 40
Typ převodu		řemenový	řemenový

Tab. 4.3 Parametry vřeten stroje MCFV 1060 [12]

Obráběcí centrum MCFV 1060						
Max. otáčky vřetene [min ⁻¹]	10 000	8 000	12 000	8 000	15 000	18 000
Výkon motoru vřetene [kW]	20/28	20/30	17/25	17/25	25/31	25/31
Krouticí moment [Nm]	244/342	306/458	96/141	143/210	159/197	159/197
Upínací kužel	ISO 40	ISO 50	ISO 40	ISO 50	ISO 40	HSK-A63
Typ převodu	planetová převodovka		řemenový		elektrovřeteno	



Obr. 4.1 Obráběcí centra: a) MCFV 1050 [11], b) MCFV 1060 [12]



4.3 TOS Olomouc, s.r.o.

Tab. 4.4 Parametry vřeten stroje FNGJ 50 A [13]

FNGJ 50 A		
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	4 000
Výkon motoru vřetene	[kW]	4
Krouticí moment	[Nm]	800
Upínací kužel		ISO 40

Tab. 4.5 Parametry vřeten stroje FGV 32 [14]

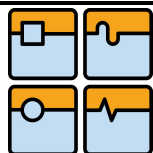
FGV 32		
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	2 000
Výkon motoru vřetene	[kW]	5,5
Krouticí moment	[Nm]	900
Upínací kužel		ISO 50

Tab. 4.6 Parametry vřeten stroje FNG 40 CNC A [15]

FNG 40 CNC A		
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	4 000
Výkon motoru vřetene	[kW]	5,5
Krouticí moment	[Nm]	900
Upínací kužel		ISO 40



Obr. 4.2 Konzolové frézky: a) FNG 40 CNC A [15], b) FGV 32 [14]



4.4 Haas Automation, Inc.

Tab. 4.7 Parametry vřeten stroje VF-8/50 [16]

VF-8/50		
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	7 500
Výkon motoru vřetene	[kW]	22,4
Krouticí moment	[Nm]	610
Upínací kužel		ISO 50

Tab. 4.8 Parametry vřeten stroje EC-500 [17]

EC-500		
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	12 000
Výkon motoru vřetene	[kW]	22,4
Krouticí moment	[Nm]	102
Upínací kužel		ISO 50

Tab. 4.9 Parametry vřeten pětiosého stroje VF-2TR [18]

VF-2TR		
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	8 100
Výkon motoru vřetene	[kW]	22,4
Krouticí moment	[Nm]	122
Upínací kužel		ISO 40



Obr. 4.2 Obráběcí stroje: a) FNG 40 CNC A [19], b) VF-2TR [20]

5. TECHNICKÉ PARAMETRY A VÝPOČET VŘETENE

Parametry pro výpočet vřetene volím pro střední velikost frézovacího stroje. Pomocí tohoto vřetene se bude obrábět ocel frézami od průměru 10mm do průměru 100mm čelním frézováním. Z těchto parametrů bude vycházet návrh vlastního vřetene.

5.1 Stanovení řezných podmínek frézování

Mezi řezné podmínky frézování patří **hloubka záběru**, **posuv na zub** a **řezná rychlost**.

- hloubka záběru** se při frézování pohybuje v rozmezí 0,5÷20 mm někdy i více.

hrubování	10÷20 mm i více
středně těžké obrábění	2÷10 mm
na čisto	0,5÷2 mm

- posuv na zub** se při frézování pohybuje v rozmezí 0,05÷0,4 mm

Tab. 5.0 Orientační posuvy na jeden zub f_z [mm / z] pro frézy ze slinutých karbidů [27]

Druh frézy	Oceli o pevnosti [MPa]				
	< 600	< 800	< 1000	< 1200	> 1200
Čelní frézy $\alpha = 60^\circ$	0,17 ÷ 0,20	0,13 ÷ 0,17	0,10 ÷ 0,13	0,07 ÷ 0,10	0,05 ÷ 0,07
Čelní frézy $\alpha = 90^\circ$	0,10 ÷ 0,14	0,11 ÷ 0,14	0,08 ÷ 0,11	0,06 ÷ 0,08	0,04 ÷ 0,06
Kotoučové frézy	0,07 ÷ 0,08	0,05 ÷ 0,06	0,05 ÷ 0,06	0,04 ÷ 0,05	0,03 ÷ 0,04
Válcové frézy	0,10 ÷ 0,15	0,08 ÷ 0,10	0,06 ÷ 0,10	0,06 ÷ 0,08	0,04 ÷ 0,06

- řeznou rychlost** při frézování udává následující tabulka

Tab. 5.1 Orientační řezné rychlosti [m/min] pro čelní frézování frézami ze slinutých karbidů [27]

Obráběný materiál	Pevnost [MPa]	Řezná rychlost v_c [m/min]	
		Hrubování	Dokončování
Nelegovaná ocel	< 500	200 ÷ 250	250 ÷ 300
	500 ÷ 600	150 ÷ 200	200 ÷ 250
	600 ÷ 700	130 ÷ 170	170 ÷ 200
	700 ÷ 850	110 ÷ 140	140 ÷ 170
	850 ÷ 1000	90 ÷ 110	110 ÷ 130
Legovaná nástrojová ocel	700 ÷ 850	100 ÷ 130	130 ÷ 160
	850 ÷ 1000	70 ÷ 90	90 ÷ 100
	1000 ÷ 1200	30 ÷ 65	65 ÷ 80
	1200 ÷ 1400	20 ÷ 40	40 ÷ 60

	1400 ÷ 1800	10 ÷ 30	30 ÷ 50
Měď	---	150 ÷ 250	250 ÷ 350
Mosaz	---	100 ÷ 200	200 ÷ 300
Slitiny Al	---	300 ÷ 500	500 ÷ 1000
Slitiny Mg	---	800 ÷ 1500	800 ÷ 1500
Plasty	---	50 ÷ 250	150 ÷ 400

Protože jako obráběný materiál jsem zvolil ocel, volím následující hodnoty:

řezná rychlost $v_c = 300 \text{ m/min}$
posuv na zub pro $\varnothing 10\text{mm}$ $f_z = 0,1 \text{ mm}$
pro $\varnothing 100\text{mm}$ $f_z = 0,2 \text{ mm}$

5.2 Výpočet maximálních otáček vřetene

Otáčky vřetene závisí na průměru nástroje a velikosti řezné rychlosti. Průměr nástroje jsem zvolil 10÷100 mm a řeznou rychlost 300m/min. Otáčky vřetene jsou nepřímosměrné průměru nástroje. Nejvyšších otáček dosáhneme při použití frézy s nejmenším průměrem. Pro výpočet použijeme vztah [31]:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D_c} \quad [\text{ot/min}]$$

Následující tabulka udává otáčky potřebné pro dosažení řezné rychlosti $v_c = 300 \text{ m/min}$, v závislosti na průměru nástroje.

Tab. 5.2 Otáčky vřetene

Průměr nástroje D_c [mm]	Otáčky n [ot/min]
10	9 549
20	4 775
30	3 183
40	2 387
50	1 909
60	1 592
70	1 364
80	1 194
90	1 061
100	955

Podle velikosti maximálních otáček $n_{\max} = 9 549 \text{ ot/min}$, zvolíme vhodný upínací systém nástrojů a vypočítáme krouticí (řezný) moment. Z těchto hodnot dále můžeme zvolit vhodný pohon vřetene.

5.3 Výpočet krouticího momentu

Krouticí moment počítám pro čelní frézování při maximálním zatížení. Ukázka způsobu použití čelního frézování je na následujícím obrázku.



Obr. 5.0 Ukázka čelního frézování [31]

Maximálního zatížení vřetene dosáhneme použitím největšího průměru nástroje a uvažováním nejméně příznivých parametrů obrábění.

Hodnoty potřebné pro výpočet maximálního momentu:

Tab. 5.3 Zvolené (známé) hodnoty

Maximální průměr nástroje	$D_c = 100 \text{ mm}$
Posuv na zub	$f_z = 0,2 \text{ mm}$
Počet zubů nástroje	$z = 4$
Otáčky nástroje	$n = 955 \text{ ot/min}$
Šířka řezu	$a_e = 100 \text{ mm}$
Hloubka řezu	$a_p = 6 \text{ mm}$
Úhel nastavení ostří	$\kappa_r = 90^\circ$
Úhel čela	$\gamma_0 = 0^\circ$
Specifická řezná síla na 1 mm^2	$k_{c1} = 1\,700 \text{ N/mm}^2$
Nárůst měrné řezné síly v závislosti na tloušťce třísky Kienzlov exponent	$m_c = 0,25 [-]$

Výpočet krouticího momentu:

Průměrná tloušťka třísky pro čelní frézování [31]:

$$h_m = \frac{360 \cdot \sin \kappa_r \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D_c \cdot \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D_c} \right)} = \frac{360 \cdot \sin 90^\circ \cdot 100 \cdot 0,2}{\pi \cdot 100 \cdot \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot 100}{100} \right)} = 0,127 \text{ mm}$$

Specifická řezná síla (Kienzlova konstanta) [31]:

$$k_c = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100} \right) = 1\,700 \cdot 0,127^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{0}{100} \right) = 2\,872 \text{ N/mm}^2$$

Rychlost posuvu [31]:

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z_c = 0,2 \cdot 955 \cdot 3 = 859,5 \text{ mm/min}$$

Požadovaný užitečný výkon [31]:

$$P_c = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6} = \frac{6 \cdot 100 \cdot 859,5 \cdot 2\,872}{60 \cdot 10^6} = 24,7 \text{ kW}$$

Řezná síla [31]:

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f_z = 2\,872 \cdot 6 \cdot 0,2 = 3\,446 \text{ N}$$

Krouticí moment [31]:

$$M_c = F_c \cdot \frac{D_c \cdot 10^{-3}}{2} = 3\,446 \cdot \frac{100 \cdot 10^{-3}}{2} = 172 \text{ N/m}$$

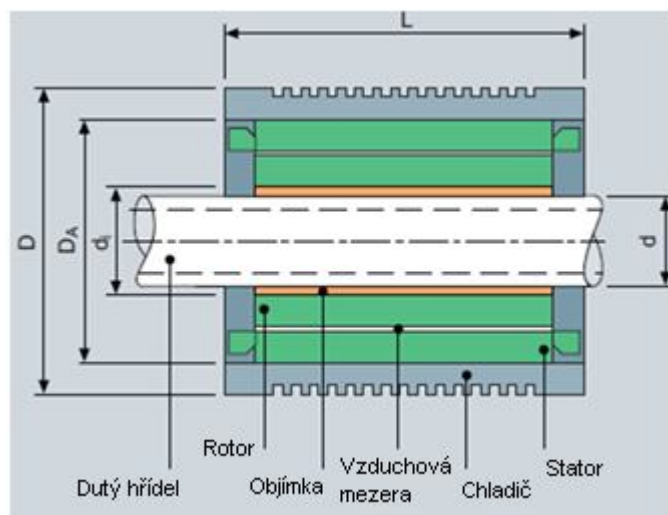
5.4 Volba pohonu vřetene

Pro pohon vřetene použiji elektromotor od firmy SIEMENS. Tato firma nabízí mimo jiné také řadu vestavěných elektromotorů 1PH2 a 1FE1. Přímý náhon pomocí vestavěného elektromotoru jsem zvolil, protože při použití tohoto typu pohonu není nutné použití připojovacích převodů. Z důvodu velkého rozsahu otáček produkuje tento motor velké množství tepla, a proto je nutné zvolit vodní chlazení. Rotory těchto motorů jsou pro chlazení vodou přizpůsobeny již výrobcem.



Obr. 5.1 Vestavěné motory pro vřetena: a) synchronní 1PH2, b) asynchronní 1FE1 [33]

Dle katalogu výrobce [34] a vypočítaných hodnot maximálních otáček a momentu vřetene, volím tento motor:



Obr. 5.2 Rozměry motoru 1PH2 [34]

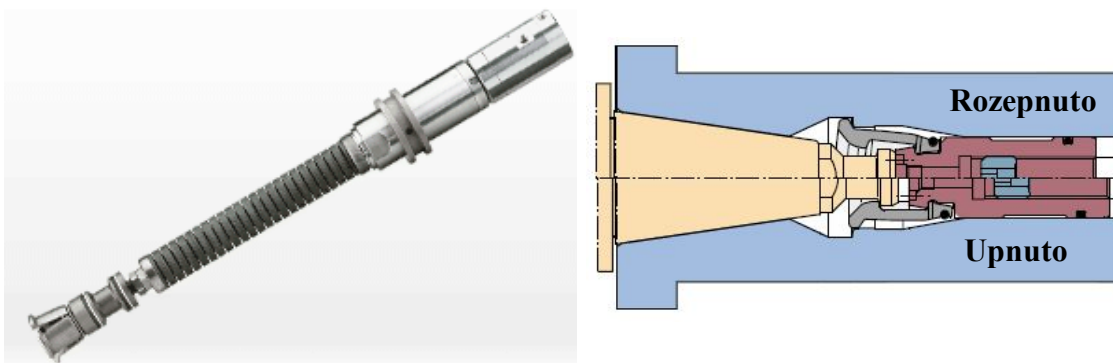
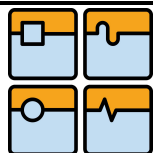
Hodnoty zvoleného motoru:

Tab. 5.4 Zvolené hodnoty motoru 1PH2118-6WF4 [34]

Typ motoru	1PH2118-6WF4
Jmenovitý výkon	26 kW
Maximální otáčky	10 000 ot/min
Krouticí moment	197 N/m
L	390 mm
D	250 mm
D_A	220 mm
d_i	100 mm
d	82 mm

5.5 Volba upínání nástroje

Pro upínání nástrojů volím upínací systém od firmy OTT-Jakob pro nástroj s ISO kuželovou stopkou. Dále volím velikost upínacího kužele ISO 40. Tento kužel se využívá u středně velkých frézovacích strojů. Dle katalogu výrobce pro kužel ISO 40 volím upínací systém ES 40, který umožňuje otáčky vřetene až 10 000 min⁻¹.



Obr. 5.3 Upínací systém OTT-Jakob pro nástroj se stopkou ISO [28]

Parametry upínacího systému ES 40:

Tab. 5.5 Parametry ES 40 [29]

ES 40		
Maximální otáčky vřetene	[min ⁻¹]	10 000
Plocha pístu	[cm ²]	18,1
Objem oleje	[cm ³]	31,7
Maximální uvolňovací tlak	[bar]	160

Pro uvolnění upínače nástroje použijí hydraulický válec téhož výrobce. Dle katalogu výrobce volím LE 60.



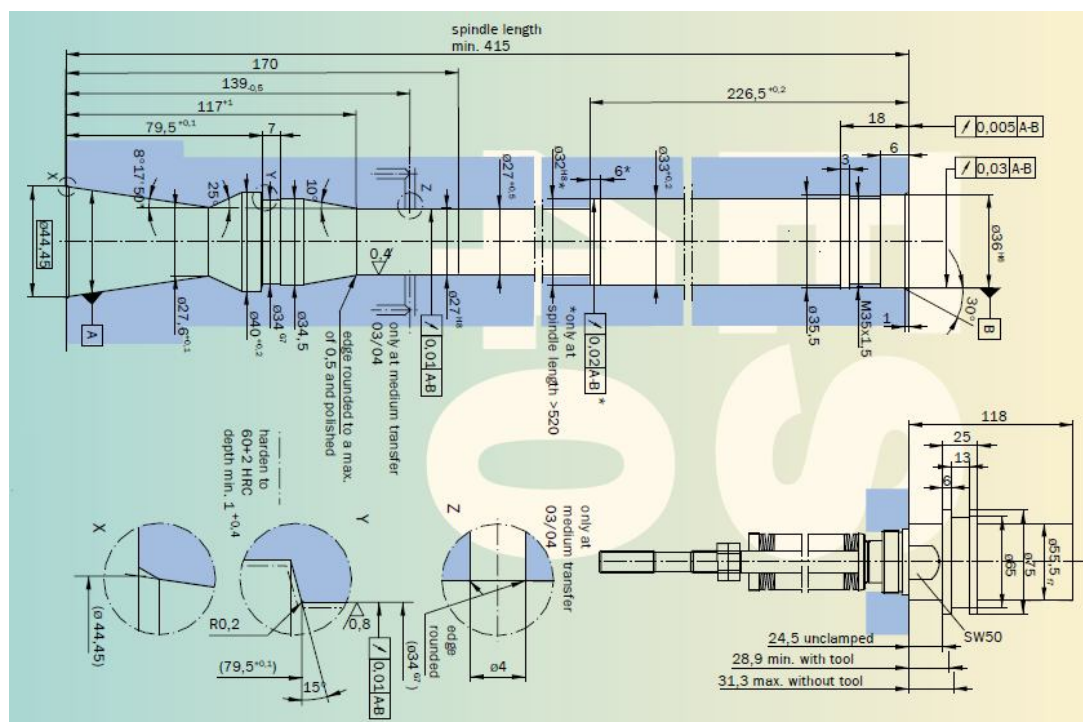
Obr. 5.4 Uvolňovací válec LE 60 [30]

Tab. 5.6 Parametry LE 60 [29]

LE 60		
Plocha pístu	[cm ²]	5.8
Uvolňovací tlak	[bar]	160
Upínací tlak	[bar]	5

5.6 Předběžné určení rozměrů vřetene

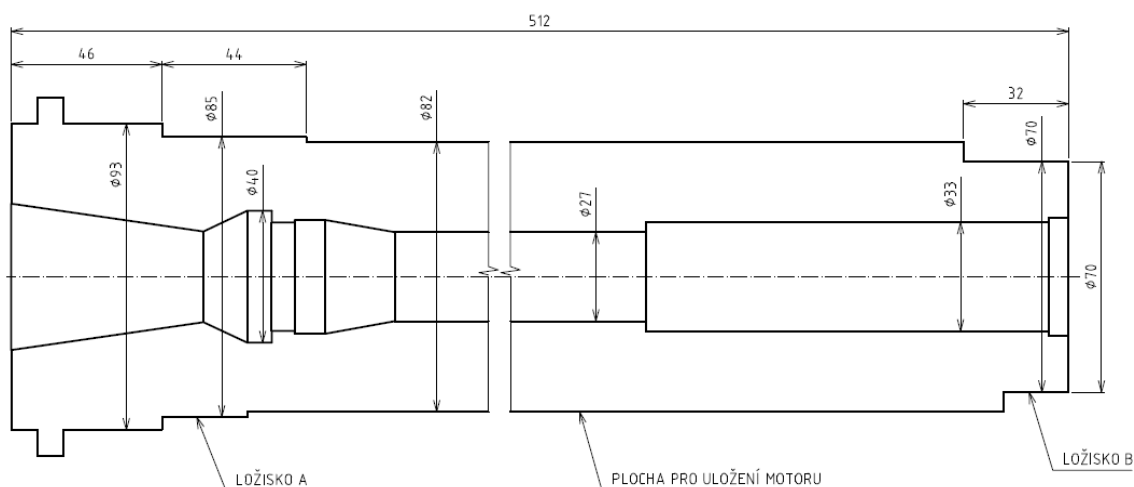
Výrobce upínacího systému ES 40 OTT-Jakob udává potřebný tvar a rozměry vnitřní dutiny vřetene. Dutina je na následujícím obrázku.



Obr. 5.5 Rozměry vnitřní dutiny vřetene [31]

Předběžné určení rozměrů:

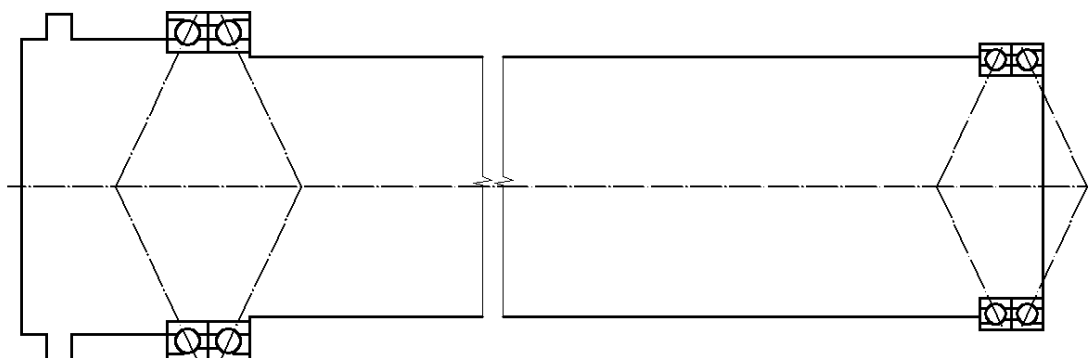
Pro zvolený upínací systém OTT-Jakob ES 40 udává výrobce potřebný tvar a rozměry vnitřní dutiny konstruovaného vřetene. Vnější rozměry vřetene, předběžně určíme podle daných rozměrů motoru pro pohon vřetene a předběžnou volbou předního a zadního ložiska.



Obr. 5.6 Předběžné rozměry navrhovaného vřetene

5.6.1 Předběžná volba ložisek:

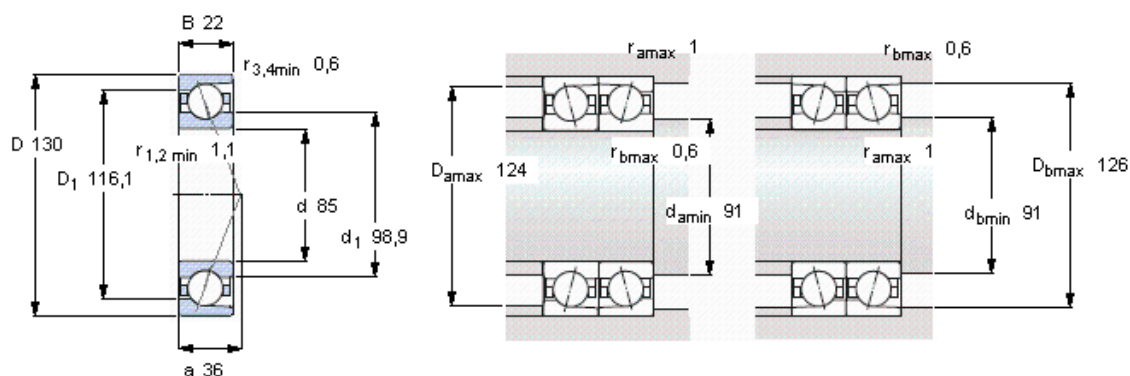
Zvolil jsem vysoce přesná kuličková hybridní ložiska s kosoúhlým stykem pro vřetena od firmy SKF. Stykový úhel ložisek je 25° . Přední i zadní ložiska budou uspořádána z důvodu zvýšení tuhosti ložisek do „O“. Ložiska budou zachycovat mimo radiálních sil vyvolaných obráběním také axiální sílu způsobenou vlastní hmotností vřetene a jeho součástí (rotor motoru, upínací systém). Dále budou ložiska zatížena i statickou axiální silou vyvolanou hydraulickým pístem, při odepínání nástroje a vlastní vahou. Ložiska budou mazána plastickým mazivem. Zvolené uspořádání ložisek je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 5.7 Uspořádání ložisek na vřetenu

ZVOLENÁ LOŽISKA:

Přední ložisko SKF 7017 ACD/HCP4A stykový úhel 25° :

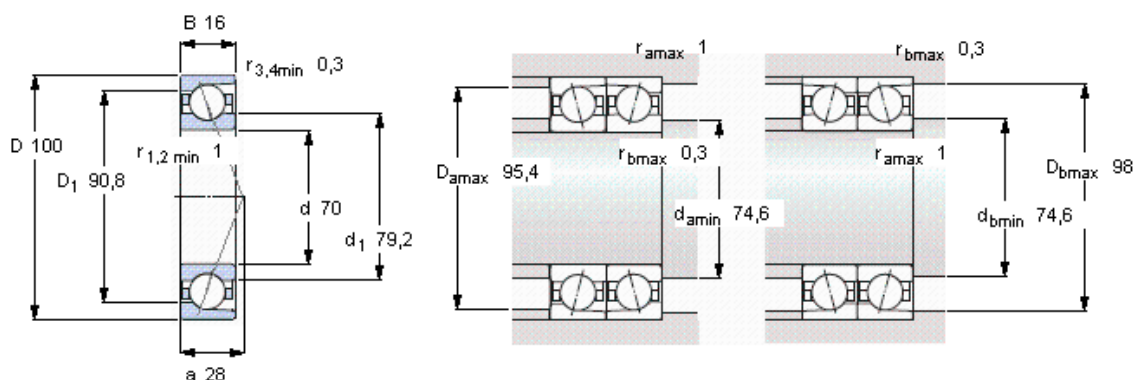


Obr. 5.7 Označení rozměrů ložisek [32]

Tab. 5.7 Rozměry a hodnoty ložisek [32]

Hlavní rozměry			Únosnost dyna- mická C	sta- tická C ₀	Mezní únavové zatížení P _u	Přípustné otáčky		Hmot- nost	Označení SKF
d	D	B				Mazání tukem	Mazání olej- vzduch		
mm			kN		kN	min ⁻¹		kg	–
85	130	22	63,7	62	2,5	10 000	17 000	0,74	7017ACD/ HCP4A

Zadní ložisko SKF 71914 ACD/HCP4A stykový úhel 25°:



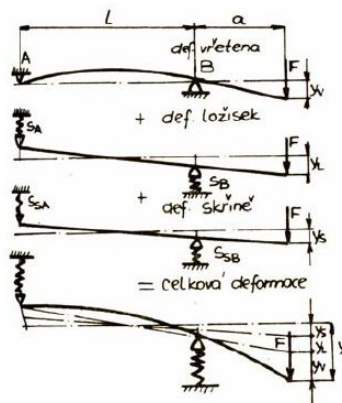
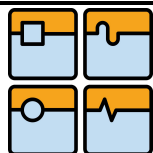
Obr. 5.8 Označení rozměrů ložisek [32]

Tab. 5.8 Rozměry a hodnoty ložisek [32]

Hlavní rozměry			Únosnost dyna- mická C	sta- tická C ₀	Mezní únavové zatížení P _u	Přípustné otáčky		Hmot- nost	Označení SKF
d	D	B				Mazání tukem	Mazání olej- vzduch		
mm			kN		kN	min ⁻¹		kg	–
70	100	16	20,3	32,5	1,37	14 000	22 000	0,28	71914 ACD/ HCP4A

5.6.2 Tuhost vřetene

Z důvodu přesnosti obrábění, musí být deformace na předním konci vřetene co nejmenší. To znamená, že tuhost předního konce vřetene musí být co největší. K výpočtům tuhosti vřetene budu využívat literaturu [2]. Celková deformace vřetene je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 5.9 Celková deformace vřetene [1]

Celková deformace vřetene je dána vztahem [2]

$$y = y_v + y_l + y_s . \quad (5.0)$$

Pro výpočet průhybu konce vřetene „ y_v “, rozdělíme vřeteno na dvě části. Na část mezi ložisky a na část převislého konce. Každá z částí má svůj moment setrvačnosti J_1 a J_2 . Deformace konce vřetene je dána vztahem [2]

$$y_v = \frac{F \cdot a^2}{3 \cdot E} \cdot \left(\frac{L}{J_1} + \frac{a}{J_2} \right) . \quad (5.1)$$

Kvadratický moment průřezu je dán vztahem

$$J = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) . \quad (5.2)$$

Pro výpočet deformací obou ložisek, musíme znát jejich tuhost „ k “ nebo jejich poddajnost „ C “. Poté za předpokladu dokonale tuhého vřetene je dána celková deformace obou ložisek vztahem [2]

$$y_l = \frac{F}{L^2} \cdot [a^2 \cdot C_A + (a + L)^2 \cdot C_B] . \quad (5.3)$$

Deformace skříně vřetene se určuje speciálně pro každé vřeteno. Matematické vyjádření deformace „ y_s “ je však docela složité, a proto ji zanedbám.

Výsledná deformace vřetene je tedy dána vztahem [2]

$$y = y_v + y_l , \quad (5.4)$$

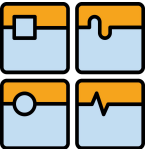
po dosazení

$$y = \frac{F \cdot a^2}{3 \cdot E} \cdot \left(\frac{L}{J_1} + \frac{a}{J_2} \right) + \frac{F}{L^2} \cdot [a^2 \cdot C_A + (a + L)^2 \cdot C_B] . \quad (5.5)$$

Hodnoty potřebné pro výpočet:

Přední konec vřetene $a = 46$ mm
Průměr zadní konec $D_1 = 82$ mm
Průměr přední konec $D_2 = 93$ mm

Modul pružnosti $E = 2,1 \times 10^5$ MPa
Vnitř. prům. zadní kon. $d_1 = 30$ mm
Vnitř. prům. přední kon. $d_2 = 40$ mm

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 40
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Tuhost ložiska	$k_A = 241 \times 10^6 \text{ N/m}$	Tuhost ložiska	$k_B = 269 \times 10^6 \text{ N/m}$
Poddajnost ložiska	$C_A = 1/k_A \text{ m/N}$	Poddajnost ložiska	$C_B = 1/k_B \text{ m/N}$
Řezná síla	$F_c = 3\,446 \text{ N}$		

Kvadratický moment průřezu vzorec 5.2:

$$J_1 = \frac{\pi}{64} \cdot (0,082^4 - 0,03^4) = 2,18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$J_2 = \frac{\pi}{64} \cdot (0,093^4 - 0,04^4) = 3,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Ideální vzdálenost ložisek L :

Ze vztahů vyplývá, že se zmenšující se vzdáleností L , bude deformace vřetene y_v menší. Naopak se snižující se vzdáleností L bude deformace ložisek y_L větší. Proto lze pro každé vřeteno vypočítat optimální vzdálenost ložisek, pro kterou bude deformace vřetene nejmenší. Pro určení optimální vzdálenosti ložisek, derivujeme rovnici 5.5 podle L a položíme ji rovnu nule [2]

$$\frac{dy}{dL} = -\frac{2 \cdot a^2}{L^3} \cdot (C_A + C_B) - \frac{2 \cdot a}{L^2} \cdot C_A + \frac{a^2}{3 \cdot E \cdot J_1} = 0 \quad . \quad (5.6)$$

Úpravou této rovnice vznikne rovnice kubická [2]

$$L^3 + \frac{6 \cdot E \cdot J_1 \cdot L}{a} \cdot C_B - 6 \cdot E \cdot J_1 \cdot (C_A + C_B) = 0 \quad . \quad (5.7)$$

Vzniklá kubická rovnice je [2]

$$x^3 + q \cdot x + r = 0 \quad , \quad (5.8)$$

kde [2]

$$r = -6 \cdot E \cdot J_1 \cdot (C_A + C_B) \quad , \quad q = \frac{-6 \cdot E \cdot J_1}{a} \cdot C_B \quad .$$

(5.9)

(5.10)

Tato kubická rovnice má tři kořeny, z nichž jeden je reálný [2]

$$x_1 = u + v \quad , \quad (5.11)$$

kde [2]

$$u = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \cdot r - \sqrt{z}} \quad , \quad v = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \cdot r + \sqrt{z}} \quad , \quad z = \frac{1}{4} \cdot r^2 + \frac{1}{27} \cdot q^3 \quad .$$

(5.12)

(5.13)

(5.14)

Optimální vzdálenost ložisek po dosazení do vzorce 5.11

$$x_1 = 0,216 \text{ m} .$$

Optimální vzdálenost ložisek vyšla $x_1 = 216 \text{ mm}$. Z důvodu rozměrů elektromotoru volím minimální vzdálenost ložisek $L = 413 \text{ mm}$.

Deformace předního konce vřetene:

Po dosazení do vzorce 5.5

$$y = 12,96 \cdot 10^{-6} \text{ m} .$$

Při použití dlouhých nástrojů, bude deformace se vzdáleností od konce vřetene narůstat (čím delší nástroj, tím větší je jeho průhyb), proto by vyložení používaných nástrojů mělo být co nejmenší. Při používání dlouhých nástrojů bude přesnost obrábění klesat.

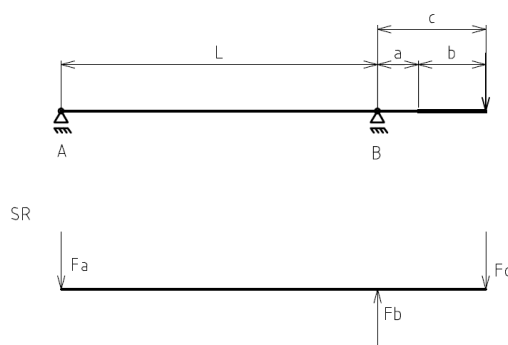
Tuhost na předním konci vřetene:

$$k = \frac{F}{y} = \frac{3\,446}{12,96 \cdot 10^{-6}} = 2,87 \cdot 10^8 \text{ N/m} \quad (5.15)$$

5.6.3 Výpočet trvanlivosti ložisek

Určení reakčních sil působících na vřeteno v uložení (ložiscích):

Při výpočtu reakčních sil budu vycházet ze statické rovnováhy. Vřeteno je nosník na dvou podporách s převislým koncem. Tento nosník je zatížen řeznou silou na převislém konci a krouticím momentem. Zatížení vřetene je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 5.10 Síly působící na vřeteno

Rozměr „c“ je vyložení předního konce vřetene „a“ plus délka nástroje „b“. Délku nástroje volím dle katalogu výrobce nástrojů. Zvolená délka nástroje je 100mm. Proto

$$c = a + b = 100 + 46 = 146 \text{ mm} . \quad (5.16)$$

Další hodnoty potřebné pro následující výpočet:

$$\begin{aligned} \text{Řezná síla} & F_c = 3\,446 \text{ N} \\ \text{Délka vřetene mezi ložisky} & L = 413 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rovnice silové a momentové rovnováhy

$$\sum F = -F_a + F_b - F_c = 0, \quad (5.17)$$

$$\sum M_A = F_b \cdot L - F_c \cdot (L + c) = 0. \quad (5.18)$$

Z rovnice 5.18 vyjádříme velikost síly F_b

$$F_b = \frac{F_c \cdot (L + c)}{L} = \frac{3\,446 \cdot (413 + 146)}{413} = 4\,664 \text{ N}. \quad (5.19)$$

Z rovnice 5.17 dopočítáme velikost síly F_a

$$F_a = F_b - F_c = 4\,664 - 3\,446 = 1\,218 \text{ N}. \quad (5.20)$$

Axiální síla vyvolaná vlastní vahou vřetene:

Axiální sílu, způsobenou vlastní vahou vřetene, je určena s využitím 3D modelu vřetene v programu Autodesk Inventor Profesional 2010.

$$m = 18,9 \text{ kg}, \text{ proto } F_{av} = m \cdot g = 18,9 \cdot 10 = 189 \text{ N}. \quad (5.21)$$

Předpínací síly ložisek:

Předpínací sílu ložisek určuje výrobce ložisek. Dle katalogu firmy SKF jsem určil předpínací síly jednotlivých ložisek:

$$\begin{aligned} \text{Ložiska A} & F_{PA} = 350 \text{ N} \\ \text{Ložiska B} & F_{PB} = 510 \text{ N} \end{aligned}$$

Výpočet trvanlivosti ložisek při čelním frézování:

Při čelním frézování jsou ložiska zatížena radiální silou vyvolanou obráběním a axiální silou, která je vyvolána vlastní tíhou vřetene a předpínací silou ložisek. Celkové axiální zatížení vypočítáme

$$F_{ax}^* = F_{Pmax} + F_{av} = 510 + 189 = 699 \text{ N}. \quad (5.22)$$

Jelikož jsem zvolil uložení ložisek A a B do O, rozloží se působící axiální síla do obou sad ložisek. Proto

$$F_{ax} = \frac{F_{ax}^*}{2} = \frac{699}{2} \doteq 350 \text{ N}. \quad (5.23)$$

Výpočet ložisek v místě A:

Dynamická únosnost ložiska	$C = 32\,500\text{ N}$
Radiální síla	$F_r = F_a = 1\,218\text{ N}$
Axiální síla	$F_{ax} = 350\text{ N}$
Otáčky	$n = 9\,549\text{ min}^{-1}$
Výpočtový součinitel	$t = 1,62$
Výpočtový součinitel	$e = 0,68$
Výpočtový součinitel	$Y_1 = 0,92$

Dynamická únosnost sady ložisek [32]

$$C_S = t \cdot C = 1,62 \cdot 32\,500 = 52\,650\text{ N} . \quad (5.24)$$

Ekvivalentní dynamické zatížení ložisek, závisí na poměru [32]

$$\frac{F_{ax}}{F_r} < e \quad (5.25)$$

$$\frac{350}{1\,218} = 0,29 < 0,68 ,$$

proto

$$P = F_r + Y_1 \cdot F_{ax} = 1\,218 + 0,92 \cdot 350 = 1\,540\text{ N} . \quad (5.26)$$

Zvolená ložiska vyhovují, protože

$$P < C_S .$$

Hodinová trvanlivost ložiska [1]

$$L_{h10} = \left(\frac{C_S}{P}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{52\,650}{1\,540}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 9\,549} \doteq 69\,746\text{ h} . \quad (5.27)$$

Výpočet ložisek v místě B:

Dynamická únosnost ložiska	$C = 63\,700\text{ N}$
Radiální síla	$F_r = F_b = 4\,664\text{ N}$
Axiální síla	$F_{ax} = 350\text{ N}$
Otáčky	$n = 9\,549\text{ min}^{-1}$
Výpočtový součinitel	$t = 1,62$
Výpočtový součinitel	$e = 0,68$
Výpočtový součinitel	$Y_1 = 0,92$

Dynamická únosnost sady ložisek [32]

$$C_S = t \cdot C = 1,62 \cdot 63\,700 = 103\,194\text{ N} . \quad (5.24)$$

Ekvivalentní dynamické zatížení ložisek, závisí na poměru [32]

$$\frac{F_{ax}}{F_r} < e \quad (5.25)$$

$$\frac{350}{4\,664} = 0,08 < 0,68 ,$$

proto

$$P = F_r + Y_1 \cdot F_{ax} = 4\,664 + 0,92 \cdot 350 = 4\,986 \text{ N} . \quad (5.26)$$

Zvolená ložiska vyhovují, protože

$$P < C_S .$$

Hodinová trvanlivost ložiska [1]

$$L_{h10} = \left(\frac{C_S}{P}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{103\,194}{4\,986}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 9\,549} \doteq 15\,473 \text{ h} . \quad (5.27)$$

Výpočet trvanlivosti ložisek při odepínání nástroje (statické zatížení):

Při odepínání nástroje působí na vřeteno axiální síla potřebná pro odepnutí nástroje a axiální síla způsobená vlastní tíhou vřetene.

Určení axiální síly:

V kapitole 5.5 jsem zvolil upínací mechanismus s uvolňovacím válcem LE 60. Výrobce udává odepínací tlak $p = 16 \times 10^6 \text{ Pa}$ a plochu pístu $S = 580 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Proto je odepínací síla F_O rovna

$$F_O = p \cdot S = 16 \cdot 10^6 \cdot 580 \cdot 10^{-6} = 9\,280 \text{ N} . \quad (5.28)$$

Hodnota axiální síly, která působí na ložiska při odepínání nástroje [32]

$$F_{Oax}^* = F_O + F_{av} = 9\,280 + 189 = 9\,469 \text{ N} . \quad (5.29)$$

Jelikož jsem zvolil uložení ložisek A a B do O, rozloží se působící axiální síla do obou sad ložisek. Proto

$$F_{Oax} = \frac{F_{Oax}^*}{2} = \frac{9\,469}{2} \doteq 4\,735 \text{ N} . \quad (5.30)$$

Výpočet ložisek v místě A:

Radiální síla	$F_r = 0 \text{ N}$
Axiální síla	$F_{Oax} = 4\,735 \text{ N}$
Statická únosnost ložiska	$C_O = 32\,500 \text{ N}$
Součinitel statické únosnosti	$s_O = 5$
Výpočtový součinitel	$Y_O = 0,76$

Ekvivalentní statické zatížení

$$P_O = F_r + Y_0 \cdot F_{Oax} = 0 + 0,76 \cdot 4\,735 \doteq 3\,599\,N \quad (5.31)$$

Vyloučení trvalé deformace ložiska:

Dle katalogu výrobce SKF, se stupeň statické bezpečnosti, který vyloučí trvalou deformaci ložiska, určí [32]

$$P_O \leq \frac{C_O}{s_O} \quad (5.32)$$

$$3\,599 \leq 6\,500 \quad .$$

Z předchozího výsledku vidíme, že zvolené ložisko vydrží statické namáhání.

Výpočet ložisek v místě B:

Radiální síla	$F_r = 0\,N$
Axiální síla	$F_{Oax} = 4\,735\,N$
Statická únosnost ložiska	$C_O = 62\,000\,N$
Součinitel statické únosnosti	$s_O = 5$
Výpočtový součinitel	$Y_O = 0,76$

Ekvivalentní statické zatížení

$$P_O = F_r + Y_0 \cdot F_{Oax} = 0 + 0,76 \cdot 4\,735 \doteq 3\,599\,N \quad (5.31)$$

Vyloučení trvalé deformace ložiska:

Dle katalogu výrobce SKF, se stupeň statické bezpečnosti, který vyloučí trvalou deformaci ložiska, určí [32]

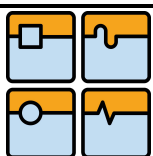
$$P_O \leq \frac{C_O}{s_O} \quad (5.32)$$

$$3\,599 \leq 12\,400 \quad .$$

Z předchozího výsledku vidíme, že zvolené ložisko vydrží statické namáhání.

5.6.4 Kontrola pevnosti vřetene

V průběhu frézování je vřeteno namáháno krutem a ohybem. Krouticí moment je po celé délce vřetene konstantní, ohybový moment se mění se vzdáleností od konce vřetene.



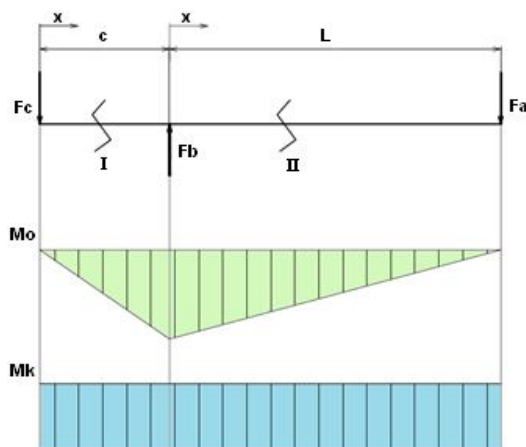
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Hodnoty potřebné pro výpočet:

Přední konec vřetene + nástroj	$c = 146 \text{ mm}$
Vzdálenost ložisek	$L = 413 \text{ mm}$
Vnější průměr v bodě B	$D_B = 85 \text{ mm}$
Vnitřní průměr v bodě B	$d_B = 40 \text{ mm}$
Řezná síla	$F_c = 3\,446 \text{ N}$
Reakční síla v bodě A	$F_a = 1\,218 \text{ N}$
Reakční síla v bodě B	$F_b = 4\,664 \text{ N}$
Krouticí moment	$M_k = 197 \text{ Nm}$

Materiál, ze kterého bude vyrobeno vřeteno, jsem zvolil podle strojnických tabulek [35] str. 237. V těchto tabulkách jsem také vyhledal příslušné hodnoty meze pevnosti a kluzu daného materiálu.

Materiál vřetene [35]	ČSN 14 220.4
Mez pevnosti [35]	$R_m = 785 \text{ MPa}$
Mez kluzu [35]	$R_e = 590 \text{ MPa}$

Průběhy momentů:

Obr. 5.11 Výsledné vnitřní účinky

$$\begin{aligned} \text{Část I:} \quad & x \in \langle 0, c \rangle \\ & M_{I0} = -F_c \cdot x \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} \text{Část II:} \quad & x \in \langle 0, L \rangle \\ & M_{II0} = -F_c \cdot (x + c) + F_b \cdot x \end{aligned} \quad (5.34)$$

Největší ohybový moment se nachází pod silou F_b . Tento ohybový moment je

$$M_{Omax} = -F_c \cdot c = -3\,446 \cdot 146 = -503\,116 \text{ N} \cdot \text{mm} . \quad (5.35)$$

Tomuto ohybovému momentu odpovídá napětí

$$\sigma_o = \frac{M_{Omax}}{W_o} = \frac{M_{Omax}}{\frac{\pi}{32} \cdot \frac{D_B^4 - d_B^4}{D_B}} = \frac{503\,116}{\frac{\pi}{32} \cdot \frac{85^4 - 40^4}{85}} \doteq 8,78 \text{ MPa} \quad (5.36)$$

Napětí v krutu je

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}} = \frac{197\,000}{\frac{\pi}{16} \cdot \frac{85^4 - 40^4}{85}} \doteq 1,72 \text{ MPa} \quad (5.37)$$

Výpočet redukovaného napětí podle podmínky HMM

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{8,78^2 + 3 \cdot 1,72^2} \doteq 9,3 \text{ MPa} \quad (5.38)$$

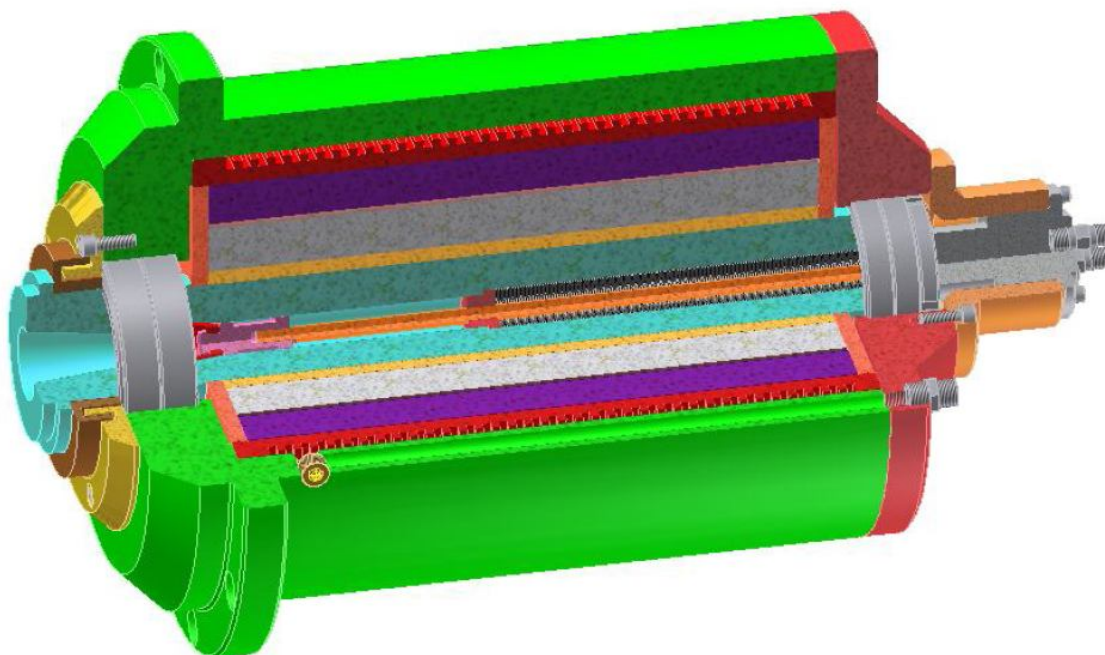
Bezpečnost vřetene k meznímu stavu pružnosti je

$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_{RED}} = \frac{590}{9,3} = 63 \quad (5.39)$$

Vřeteno vyhovuje, jelikož bezpečnost k meznímu stavu pružnosti je vysoká.

6. KONSTRUKCE VŘETENE

Při konstrukci vřetene, jsem vycházel z rozměrů součástí vřetene, které jsem si na základě rešerše zvolil. Rozměry vnitřní dutiny vřetene, jsou určeny dle automatického upínacího systému nástrojů a dle typu upínacího kužele. Vnější průměry vřetene, jsou dány především dle rozměrů statoru elektromotoru a vnitřními průměry ložisek. Mazání zvolených ložisek bude tukem. Z důvodu zvýšení přesnosti chodu, bude vřeteno chlazeno vodou. Vodou bude chlazen i stator elektromotoru, který je pro takovéto chlazení přizpůsoben již výrobcem.



7. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout vřeteno frézovacího stroje dle zvolených parametrů. Zvolil jsem si čelní frézování oceli pomocí fréz o průměru od 10mm do 100mm.

Nástroje jsou upínány pomocí kuželu ISO 40 a automatického upínacího systému od firmy Ott-Jacob. Pro upínání a odepínání nástrojů je potřebný hydraulický válec.

Vřeteno je navrženo jako tubus, který se připevní ke stroji. Vřeteno je poháněno pomocí vestavěného motoru od firmy SIEMENS. Parametry navrhnutého vřetene jsou v následující tabulce.

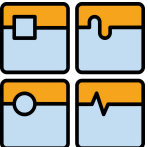
Tab. 7.0 Parametry navrhnutého vřetene

Název veličiny	Hodnota
Maximální otáčky	$n = 10\,000 \text{ ot/min}$
Krouticí moment	$M_k = 172 \text{ N/m}$
Výkon vřetene	$P = 24,7 \text{ kW}$
Maximální průměr nástroje	$D_c = 100 \text{ mm}$
Minimální průměr nástroje	$D_c = 10 \text{ mm}$
Upínací kužel	ISO 40
Pohon vřetene	Elektro motor

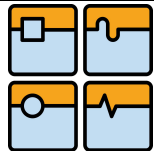
Při návrhu vřetene jsem pro výpočet používal program MAPLE 12, pro tvorbu sestavy a 3D modelu AUTODESK INVENTOR PROFESIONAL 2010.

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů. MM Speciál. Praha: MM publishing, s.r.o, 2010. 420 s. 2. upravené a doplněné vydání. ISBN: 978-80-254-7980-3.
- [2] BORSKÝ, V. Základy stavby obráběcích strojů, 2. vydání Brno: VUT Brno, 1991. 214 s. ISBN 80-214-0361-6.
- [3] KATALOG FIRMY SKF *Vysoce přesná ložiska* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: < http://www.skf.com/iec_documents/6810_EN.pdf>.
- [4] KATALOG FIRMY FAG, *Super přesná ložiska* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:< http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/library/schaeffler_2/brochure/downloads_1/ac_41130_7_de_cz.pdf>.
- [5] KOLÁŘ, Petr, Vřetenová ložiska, *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. 080117 Dostupné z WWW:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/emo-hannover-poctvrte-vretena-a-vretenova-loziska.html>>.
- [6] KOLÁŘ, Petr, Jan Moravec, Vřetena a jejich komponenty, *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. 100506 Dostupné z WWW:< <http://www.mmspektrum.com/clanek/vretena-a-jejich-komponenty.html>>.
- [7] KATALOG FIRMY Haas Automation, *Main spindle features* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.haascnc.com/DOCLIB/brochures/VMC/index.html#/22/>>.
- [8] WEBOVÉ STRÁNKY FIRMY *Direct industry* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:< <http://www.directindustry.com/prod/omlat/milling-spindles-14590-410848.html>>.
- [9] *MCV 750* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.kovosvit.cz/cz/mcv-750/>>.
- [10] *MCU 630 5X* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.kovosvit.cz/cz/mcu-630-5X/>>.
- [11] *MCFV 1050* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.tajmac-zps.cz/cs/MCFV-1050>>.
- [12] *MCFV 1060* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:< <http://www.tajmac-zps.cz/cs/MCFV-1060>>.
- [13] *FNGJ 50 A* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.tos-olomouc.cz/oc-cz/vyrobní-program/univerzální-produkční-frezky/nastrojarská-frezka-fngj-50-a/technické-parametry.html>>.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 50
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [14] *FGV 32* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW:< <http://www.tos-olomouc.cz/oc-cz/vyrobní-program/univerzální-produkční-frezky/konzolová-frezka-fgv-32/technické-parametry.html>>.
- [15] *FNG 40 CNC A* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW:< <http://www.tos-olomouc.cz/oc-cz/vyrobní-program/numericky-rizene-konzolové-frezky/nastrojarská-frezka-se-souvislým-rizením-fng-40-cnc-a/technické-parametry.html>>.
- [16] *VF-8/50 SPECIFICATIONS* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.haascnc.com/mobile/specs.asp?id=VF-8/50&intLanguageCode=1033>>.
- [17] *EC-500 SPECIFICATIONS* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.haascnc.com/mobile/specs.asp?id=EC-500&intLanguageCode=1033>>.
- [18] *VF-2TR SPECIFICATIONS* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.haascnc.com/mobile/specs.asp?id=VF-2TR&intLanguageCode=1033>>.
- [19] *VF-8/50* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.haascnc.com/mobile/details.asp?intLanguageCode=1033&Id=VF-8/50>>.
- [20] *VF-2TR* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.haascnc.com/mobile/details.asp?intLanguageCode=1033&Id=VF-2TR>>.
- [21] WEBOVÉ STRÁNKY FIRMY *Carbideprocessors* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.carbideprocessors.com/cnc-tool-holder-iso-30-x-er-32-w-locking-teeth-southeast-tool-sepe30dm20/>>.
- [22] WEBOVÉ STRÁNKY FIRMY *Maritool* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.maritool.com/Tool-Holders-HSK/c23_46/p82/HSK-50A-ER32-COLLET-CHUCK-TOOL-HOLDER/product_info.html>.
- [23] WEBOVÉ STRÁNKY *Interempresas* [online]. 2012 [cit.2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.interempresas.net/MetalWorking/Articles/55475-Sandvik-Coromant-presents-innovations-for-the-energy-industry-aerospace-automotive-and.html>>.
- [24] WEBOVÉ STRÁNKY FIRMY *Big Kaiser precision tooling* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: < <http://www.bigplustooling.com/contact.html>>.
- [25] WEBOVÉ STRÁNKY FIRMY *Sandvik* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coromant_capto/Pages/default.aspx>.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 51
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [26] WEB *Řezné podmínky při obrábění* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf>.
- [27] WEBOVÉ STRÁNKY *Strojírenství frézování* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://strojirenstvi-frezovani.blogspot.com/2011/03/11-rezne-podminky.html>>.
- [28] WEBOVÉ STRÁNKY FIRMY *Advanced Machine and Engineering* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.ame.com/products/ott-spindle-interface/>>.
- [29] KATALOG FIRMY *Ott-Jakob, Modular clamping technology* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:<http://www.ott-jakob.de/images/katalog_e.pdf>
- [30] LE 60 *ott-jakob* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.ott-jakob.de/en/produkte/le/hydraulisch.php>>.
- [31] KATALOG FIRMY *Sandvik Coromat* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.ott-jakob.de/en/produkte/le/hydraulisch.php>>.
- [32] KATALOG FIRMY SKF *Vysoce přesná ložiska* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.skf.com/iec_documents/6810_EN.pdf>.
- [33] KATALOG FIRMY SIEMENS *Motors, Spindle solutions* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.automation.siemens.com/mcms/infocenter/content/en/Pages/order_form.aspx?nodeKey=key_516819&InfoType=brochures>.
- [34] KATALOG FIRMY SIEMENS *Asynchronous motors* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW:<<https://eb.automation.siemens.com/goos/catalog/Pages/Templates/collateral.axd/?id=219689&versionid=230>>.
- [35] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. 4. doplněné vydání. Úvaly:Albra–pedagogické nakladatelství, 2008. 914 s.ISBN 978-80-7361-051-7.

9. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	[mm]	Přední konec vřetene
a	[mm]	Vyložení předního konce vřetene
a_e	[mm]	Šířka řezu
a_p	[mm]	Hloubka řezu
B	[mm]	Šířka ložiska
b	[mm]	Délka nástroje
C	[kN]	Dynamická únosnost ložiska
c	[mm]	Celkové vyložení
C_0	[kN]	Statická únosnost
C_A, C_B	[m/N]	Poddajnost ložiska
C_S	[N]	Dynamická únosnost sady ložisek
D_1	[mm]	Průměr zadní konec
d_1	[mm]	Vnitřní průměr zadní konec
D_2	[mm]	Průměr přední konec
d_2	[mm]	Vnitřní průměr přední konec
D_c	[mm]	Průměr nástroje
E	[MPa]	Modul pružnosti
e	[-]	Výpočtový součinitel
F_A	[N]	Axiální síla
F_a, F_b	[N]	Reakce v ložiscích
F_{av}	[N]	Axiální síla
F_c	[N]	Řezná síla
F_O	[N]	Odepínací síla
F_{PA}, F_{PB}	[N]	Předpínací síla
F_R	[N]	Radiální síla
f_z	[mm]	Posuv na zub
g	[m/s ²]	Gravitační zrychlení
h_m	[mm]	Průměrná tloušťka třísky
J	[m ⁴]	Kvadratický moment průřezu
k	[N/m]	Tuhost předního konce vřetene
k_A, k_B	[N/m]	Tuhost ložiska
k_{cl}	[N/mm ²]	Specifická řezná síla
k_k	[-]	Bezpečnost k meznímu stavu pružnosti
L	[mm]	Vzdálenost ložisek
L_h	[h]	Životnost ložiska
L_{h10}	[h]	Hodinová trvanlivost ložiska
m	[kg]	Hmotnost vřetene
m_c	[-]	Kienzlův exponent
M_c	[N/m]	Krouticí moment

M_k	[Nm]	Krouticí moment
M_{omax}	[Nmm]	Maximální ohybový moment
n	[min ⁻¹]	Otáčky vřetene
n_m	[min ⁻¹]	Střední otáčky ložiska
P	[N]	Ekvivalentní dynamické zatížení
p	[-]	Mocnitel
P_c	[kW]	Požadovaný řezný výkon
Re	[MPa]	Mez kluzu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti
s_0	[-]	Součinitel statické únosnosti
t	[-]	Výpočtový součinitel
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[mm/min]	Rychlost posuvu
W_k	[mm ³]	Průřezový modul v krutu
W_O	[mm ³]	Průřezový modul v ohybu
X	[-]	Radiální koeficient
x_1	[m]	Optimální vzdálenost ložisek
y_v	[m]	Deformace konce vřetene
z	[-]	Počet zubů nástroje
Y	[-]	Axiální koeficient
y	[m]	Celková deformace vřetene
Y_1, Y_0	[-]	Výpočtový součinitel
γ_0	[°]	Úhel čela
κ_r	[°]	Úhel nastavení ostří
σ_O	[MPa]	Ohybové napětí
σ_{RED}	[MPa]	Redukované napětí
τ_k	[MPa]	Těčné napětí

10. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Rozdělení frézovacích strojů	13
Obr. 2.1	Vlivy na pracovní přesnost obráběcího stroje	15
Obr. 2.2	Druhy zástavby vřetene	15
Obr. 2.2	Etapy návrhu uložení vřetene	16
Obr. 2.3	Typy vysoce přesných ložisek	17
Obr. 2.4	Uspořádání ložisek	18
Obr. 2.5	Příklady ložiskových sad FAG a jejich označení	18
Obr. 2.6	Možnosti vyvolání předpětí v ložisku s kosoúhlým stykem	19
Obr. 2.7	Mazací systémy	20
Obr. 2.8	Příklady způsobů mazání ložisek olejem	21
Obr. 2.9	Druhy náhonů vřetene	22

Obr. 2.10	Náhon vřetene	22
Obr. 2.11	Vřeteno Fischer MFW-1412/36/20 s chlazenou hřídelí	23
Obr. 2.12	Vřeteno a motor chlazené vzduchem	23
Obr. 3.0	Nástrojová soustava firmy Sandvik Coromat	24
Obr. 3.1	Nástrojové držáky	24
Obr. 3.2	Upínání ISO kužele OTT-Jakob	25
Obr. 3.3	Upínání HSK kužele OTT-Jakob	25
Obr. 4.0	Obráběcí centra	26
Obr. 4.1	Obráběcí centra	27
Obr. 4.2	Konzolové frézky	28
Obr. 4.2	Obráběcí stroje	29
Obr. 5.0	Ukázka čelního frézování	32
Obr. 5.1	Vestavěné motory pro vřetena	33
Obr. 5.2	Rozměry motoru 1PH2	34
Obr. 5.3	Upínací systém OTT-Jakob pro nástroj se stopkou ISO	35
Obr. 5.4	Uvolňovací válec LE 60	35
Obr. 5.5	Rozměry vnitřní dutiny vřetene	36
Obr. 5.6	Předběžné rozměry navrhovaného vřetene	36
Obr. 5.7	Uspořádání ložisek na vřetenu	37
Obr. 5.7	Označení rozměrů ložisek	37
Obr. 5.8	Označení rozměrů ložisek	38
Obr. 5.9	Celková deformace vřetene	39
Obr. 5.10	Síly působící na vřeteno	41
Obr. 5.11	Výsledné vnitřní účinky	46

11. SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1	Porovnání vlastností ložiskové ocele a nitridu křemíku	17
Tab. 3.0	Typ kužele podle otáček vřetene	25
Tab. 4.0	Parametry vřeten stroje MCV 750	26
Tab. 4.1	Parametry vřeten stroje MCU 630V - 5X	26
Tab. 4.2	Parametry vřeten stroje MCFV 1050	27
Tab. 4.3	Parametry vřeten stroje MCFV 1060	27
Tab. 4.4	Parametry vřeten stroje FNGJ 50 A	28
Tab. 4.5	Parametry vřeten stroje FGV 32	28
Tab. 4.6	Parametry vřeten stroje FNG 40 CNC A	28
Tab. 4.7	Parametry vřeten stroje VF-8/50	29
Tab. 4.8	Parametry vřeten stroje EC-500	29
Tab. 4.9	Parametry vřeten ptětiosého stroje VF-2TR	29
Tab. 5.0	Orientační posuvy na jeden zub f_z [mm / z] pro frézy ze slinutých karbidů	30
Tab. 5.1	Orientační řezné rychlosti [m/min] pro čelní frézování frézami ze slinutých karbidů	30
Tab. 5.2	Otáčky vřetene	31
Tab. 5.3	Zvolené (známé) hodnoty	32
Tab. 5.4	Zvolené hodnoty motoru 1PH2118-6WF4	34
Tab. 5.5	Parametry ES 40	35

Tab. 5.6	Parametry LE 60	35
Tab. 5.7	Rozměry a hodnoty ložisek	38
Tab. 5.8	Rozměry a hodnoty ložisek	38
Tab. 7.0	Parametry navrhnutého vřetene	48

12. SEZNAM PŘÍLOH

- CD - elektronická verze bakalářské práce
- 3D model vřetene
 - výkres sestavy vřetene
 - kusovník

Výkres sestavy vřetene