



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

STAVEBNICOVÝ SYSTÉM VÝMĚNNÝCH HLAV U FRÉZOVACÍCH OBRÁBĚCÍCH CENTER S VODOROVNOU OSOU VŘETENA CENTER SMYKADLOVÉHO TYPU

THE MODULAR SYSTEM OF INTERCHANGEABLE HEADS FOR MILLING MACHINING CENTERS WITH HORIZONTAL SPINDLE CENTER RAM TYPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Musil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Adam Musil
Studijní program:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA
Akademický rok:	2021/22

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

Stavebnicový systém výměnných hlav u frézovacích obráběcích center s vodorovnou osou vřetena center smykadlového typu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obráběcí centra tohoto typu jsou jedním z moderních koncepcí CNC obráběcích strojů. Umí využívat frézovací i soustružnické operace, čímž se stávají universálním výrobním prostředkem. Jedním z možných konstrukčních řešení které zvyšuje jejich technologickou adaptibilitu je automatický systém výměnných hlav. Pokud je tento systém výměny navíc stavebnicový, významným způsobem snižuje náklady výrobce takových strojů.

Cíle diplomové práce:

Rozbor současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.

Systémový rozbor řešené problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.

Návrh variant stavebnicového systému, zdůvodnění výběru optimální varianty řešení, a stanovení jeho technických parametrů.

Návrhy nejméně tří konstrukčních variant ortogonální hlavy s osou B, zdůvodnění výběru optimální varianty řešení, a stanovení jeho technických parametrů.

Výkres sestavy ortogonální hlavy s osou B, kusovník a min. 5 výkresů vyráběných dílů.

Potřebné technické výpočty.

Komentář k přiložené výkresové dokumentaci.

Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, s.r.o., 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.

JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. Expertní inženýrství v systémovém pojetí. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.

BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. Brno: Vysoké učení technické, 1986.

Firemní literatura a www stránky výrobců obráběcích strojů.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o porovnání několika konstrukčních řešení obráběcích hlav, zhodnocení jejich kladů, záporů a klíčových vlastností potřebných pro určitý typ obrobku. Dále obsahuje výpočty nezbytných k její přesné a spolehlivé funkci. Práce zahrnuje také výběr konstrukčního řešení, 3D model a výkresovou dokumentaci sestavy a klíčových komponent.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with comparison of some milling head's construction solutions, evaluate the positives, negatives and key features needed for specific type of workpiece. Also contains required calculations for it's precise and reliable function. This thesis includes selection of the construction solution, 3D model and an assembly drawing and some drawings of the main components.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obráběcí hlava, 2-osé natáčení, těžké obráběcí stroje, kontinuální obrábění, frézka

KEYWORDS

Milling head, 2 axis rotation, heavy machining machine, continuous machining, milling machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MUSIL, A. *Stavebnicový systém výměnných hlavu frézovacích obráběcích center s vodorovnou osou vřetena center smykadlového typu*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2022, 67 s., Vedoucí diplomové práce Prof. Dr. Ing. Jiří Marek, PH.D.,DBA

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Prof. Dr. Ing. Jiřího Marka, PH.D.,DBA a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 17.5.2022

.....
Bc. Adam Musil

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	15
2.1	Výměnné obráběcí hlavy	15
2.2	Základní rozdělení hlav	16
2.3	Typy výměnných obráběcích hlav	17
2.3.1	Přímá hlava	17
2.3.2	Pravoúhlá hlava	18
2.3.3	Vidlicová hlava.....	18
2.3.4	Ortogonální hlava	19
2.3.5	Univerzální hlava.....	19
2.3.6	Lící deska.....	20
2.3.7	Nožové hlavy	20
3	TECHNICKÝ POPIS.....	21
3.1	Tělo obráběcí hlavy	21
3.2	Vřeteno.....	22
3.3	Uložení vřetena	23
3.4	Předeprnutí ložisek.....	24
3.5	Uložení otočné osy.....	24
3.6	Možnosti pohonu osy B	25
3.7	Možnosti pohonu nástroje.....	26
3.8	Ozubení.....	26
3.9	Periferie.....	27
3.9.1	Mazání	27
3.9.2	Chlazení	27
3.9.3	Těsnění.....	28
3.9.4	Indexování	28
4	TECHNOLOGICKÉ OPERACE	29
4.1	Frézování	29
4.2	Vrtání	30
5	SYSTÉMOVÝ ROZBOR	31
5.1	Problémová situace	32
5.2	Formulace problému	32
5.3	Formulace cílů řešení.....	32
5.4	Popis řešení soustavy	32
6	KONSTRUKČNÍ VARIANTY	33
6.1	Varianta 1.....	33
6.2	Varianta 2.....	34
6.3	Varianta 3.....	34
6.4	Varianta 4.....	35
6.5	Varianta 5.....	35
6.6	Varianta 6.....	36
7	VÝBĚR NEJVHODNĚJŠÍ VARIANTY	37
7.1	Postup při výběru varianty metodou pořadí.....	37

8	KONSTRUKČNÍ NÁVRH	39
8.1	Vstupní parametry.....	39
8.1.1	Frézování	40
8.1.2	Vrtání	42
8.1.3	Návrh kuželového soukolí	44
8.1.4	Návrh motorů pro pohon B-osy	46
8.2	Návrh vřetena.....	47
8.2.1	Materiál vřetena	47
8.2.2	Výsledné vnitřní silové účinky	49
8.2.3	Výpočet bezpečnosti vůči meznímu stavu: průřez I	51
8.2.4	Výpočet bezpečnosti vůči meznímu stavu: průřez II.....	52
8.2.5	Výpočet bezpečnosti vůči meznímu stavu: průřez III	53
8.3	Volba a návrh ložisek	54
8.4	Trvanlivost ložisek.....	54
8.5	Trvanlivost čelních ložisek vřetene	55
8.6	Axiálně radiální ložisko	56
9	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	57
10	ZÁVĚR.....	59
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
12	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	63
12.1	Seznam použitých zkratk	63
12.2	Seznam použitých symbolů	63
12.3	Seznam tabulek	65
12.4	Seznam obrázků.....	65
13	SEZNAM PŘÍLOH	67

1 ÚVOD

Při volbě tématu diplomové práce mi bylo navrženo téma na výměnu frézovací a vyvrtávací ortogonální hlavu, pro kontinuální natáčení při obrábění pro těžké obráběcí stroje společnosti TOS Kuřim. Jelikož se v této firmě používají většinou hlavy bez kontinuálního naklápění (hlavu nelze pootočit do požadované pozice, aniž by došlo k zastavení nástroje) byl to hlavní důvod, proč jsem se rozhodl pro konstrukční řešení kontinuálně naklápěné hlavy, Aby bylo možné hlavu nastavit do požadované polohy již při obrábění. Hlava je otočná kolem osy kolmé k nástroji. Toto řešení nejen zrychlí výrobu obráběné součásti, ale i zjednoduší celkovou konstrukci po mechanické stránce, jen se mírně zkomplikuje po stránce programování, ať už se jedná o chod motorů v režimu Master Slave a přímé odměřování natočení hlavy přímo na axiálně-radiálním ložisku.

Parametry na dělicí rovině od vřeteníku, k němuž se hlava připojuje jsou, vstupní kroutící moment 2000 Nm, hydraulické upnutí s aretací do Hirthova věnce, maximální otáčky 6000 za minutu a převod médií pomocí rychlospojek. Aby byla zajištěna kompatibilita se vším, co již firma z Kuřimi využívá a mohla sloužit k rozšíření sortimentu nabízeného touto společností, musí být osazena upínáním pomocí kužele ISO 50, aby bylo možné automaticky vyměnit a použít nástroje ze zásobníku i pro ostatní hlavy. Mazání ložisek a ozubených kol bude zajištěno tukem, jehož náplň se mění na základě frekvence používání a jeho stáří.

Při zpracování této práce bylo hlavním problémem dosáhnout dostatečné tuhosti, s co neměnými náklady na výrobu, co nejlehčími dílci, a to vše dostat do kompaktního těla.

První kapitola této práce se zabývá současným stavem poznání a definicí, co to obráběcí hlava je, jaké jejich druhy existují a k čemu se dané typy hlav používají. Dále jsou obsahem práce hodnotící kritérium k výběru té nejvhodnější varianty, výpočty obráběcích sil, na jejichž základě jsou spočítány reakce sil působících na ložiska a výběr vyhovujících ložisek, pevnostní výpočet vřetene, samotné konstrukční řešení.

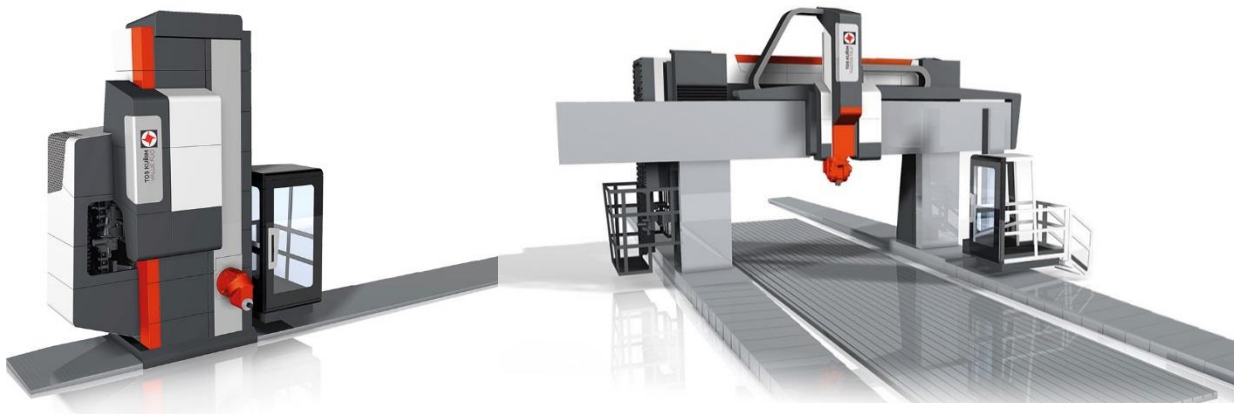
Závěr této práce, je zaměřen na zhodnocení práce z ekonomického, konstrukčního hlediska a celkový souhrn práce.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

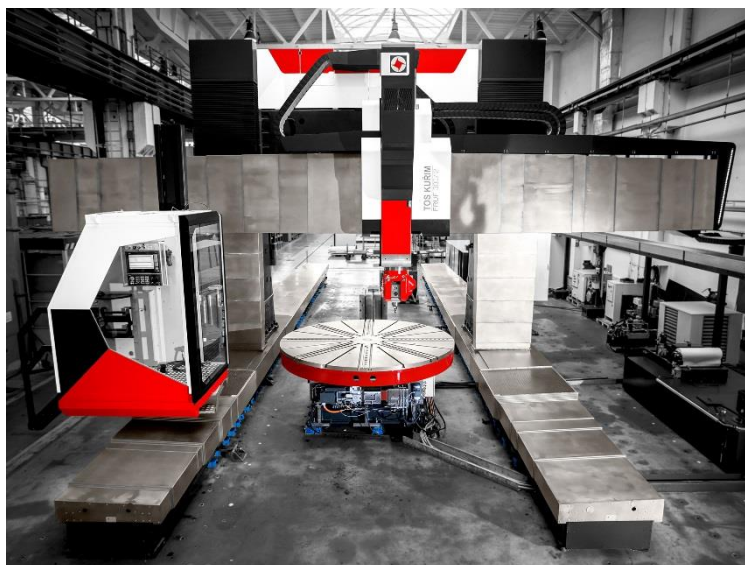
2.1 Výměnné obráběcí hlavy

Výměnné obráběcí hlavy jsou hojně využívaným příslušenstvím hlavně u těžkých obráběcích center, jako na příklad ve firmě TOS Kuřim, ať už horizontálních nebo vertikálních (Obr. 1). Každá z hlav má své specifické využití, některé se hodí na vrtání děr, jiné na frézování velkých ploch, u strojů s otočným stolem se dá do hlavy upnout i nůž k soustružení rozměrných rotačních součástí, lze je tedy využít i jako karusel.

Použitím různých typů hlav roste variabilita a univerzálnost stroje. Kupříkladu 3-osé obráběcí centrum má s přímou hlavou stále jen 3 osy, vybavíme-li toto centrum vidlicovou hlavou (popis v další kapitole) s natáčením ve vřeteníku, dostaneme 5-osé až 6-osé obráběcí centrum schopné obrábět i kulové plochy [1].



Obr. 1) a) Horizontální obráběcí centrum TOS FU b) Portálové obráběcí centrum TOS FRU [2]



c) Portálové obráběcí centrum s otočným stolem TOS FRUF [2]

2.2 Základní rozdělení hlav

1. Hlavy frézovací jedno-osé (natáčení hlavy je možné pouze v jedné ose)

- Přímá hlava
- Pravoúhlá hlava

2. Hlavy frézovací více-osé (natáčení hlavy je možné ve více osách)

- Vidlicová hlava
- Ortogonální hlava
- Univerzální hlava

3. Speciální hlavy

- Lící deska na čelní soustružení
- Nožové hlavy pro karusely

4. Možnosti pohonu jednotlivých os

- Pohon přes ozubené soukolí od vřetene
- Pohon pomocí momentového motoru
- Pohon dvěma předepnutými pastorky Master-Slave
- Pohon přes předepnutý šnekový převod
- Manuální natáčení hlavy

5. Možnosti pohonu nástroje

- Přes ozubené soukolí od vřetene
- Pomocí elektrovřetena zabudovaného přímo v hlavě

6. Způsob výměny hlavy/ nástroje

- Automatické – Hydraulické, nebo pneumatické upínání
- Manuální

2.3 Typy výměnných obráběcích hlav

V předchozí kapitole bylo zmíněno, že výměnné hlavy zvyšují různorodost obrobků, které je možné na obráběcích centrech třískovým obráběním vyrobit. Neboť naklápění hlavy v různých osách zvyšuje variabilitu obrobků, které je obráběcím strojem možné vyrobit, případně při použití hlav s více osami otáčení se dají obrábět i složitější dílce např. se sférickými a různě zkosenými prvky.

2.3.1 Přímá hlava

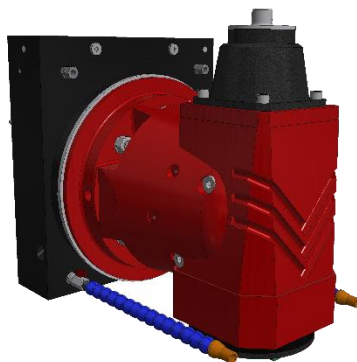
Tato hlava má náhon od vřetene, nástroj může mít shodné otáčky s otáčkami vřetene, nebo může být v hlavě umístěna převodovka, ke zvýšení krouticího momentu potřebného hlavně pro hrubování. Přímými hlavami jsou obráběny plochy kolmé na vřeteno, mohou být použity i k vrtání a vyvrtávání otvorů v ose vřetene. Vyrábějí se v různých délkách, kratší je zobrazena na (Obr. 2), kratších hlav se využívá zpravidla pro hrubování, neboť mají vyšší tuhost.



Obr. 2) Přímá frézovací hlava Madaula G.190 [3]

2.3.2 Pravoúhlá hlava

U těchto hlav je osa nástroje kolmá k ose vřetene stroje (Obr. 3). Její otáčení kolem osy C může být realizováno přímo z vřeteníku otočnou dělicí rovinou, nebo je otáčecí mechanismus zabudován v hlavě, kde je pohyb osy realizován jedním z výše popsaných pohonů os. Hlavu je možné použít k obrábění povrchů rovnoběžných s osou vřetene stroje, případně je možné obrábět i kruhové obrobky, ty je však vhodnější vyrábět na karuselech. Nástroj je poháněn vřetenem přes kuželové soukolí, mezi nástroj a vřeteno může být vložena převodovka, ke zvýšení kroutícího momentu při hrubování.



Obr. 3) Kolmá frézovací hlava Fermat PHM 37 [4]

2.3.3 Vidlicová hlava

Jak již název napovídá jedná se o hlavu, jejíž nástroj se naklápí ve vidlici. Tím, že je vřeteno hlavy drženo ze dvou stran má hlava vysokou tuhost. Pokud neobsahuje elektrovřeteno pro pohon nástroje a v jednom rameni momentový motor pro natáčení vřetene hlavy, nachází se v jednom rameni vidlice ozubené soukolí s motorem k naklápění vřetene hlavy a v druhém kuželové soukolí k pohonu nástroje od vřetene stroje. Provedení s elektrovřetenem se používá spíše pro dokončovací operace (jejich kroutící moment není tak velký jako přímým náhonem z vřeteníku) a provedení s pohonem nástroje od vřetene přes kuželové ozubení se používá pro hrubování. Verze s elektrovřetenem může být navíc naklápěna i v 3. ose jako je tomu u provedení firmy Zimmermann (Obr. 4).



Obr. 4) Vidlicová hlava Zimmermann M3ABC [5]

2.3.4 Ortogonální hlava

Ortogonální, se od pravoúhlé hlavy liší navíc polohováním ve 2. osách, kolem osy C (osa vřetene stroje) a kolem osy B (kolmá k ose C). Tato hlava slouží k vrtání a frézování ploch v úhlech těžko dosažitelných pro jiné hlavy (Obr. 5).



Obr. 5) Ortogonální hlava TOS Varnsdorf HOIL 50 [6]

2.3.5 Univerzální hlava

Univerzální hlavy jsou specifické možností překlápění kolem osy natočené vůči ose C o úhel 45°, pohyb kolem této osy může být realizován náhonem od vřetene, kdy se pro každé natočení musí vřeteno zastavit, nebo momentovým motorem, jenž umožňuje kontinuální obrábění, může tedy v kombinaci s natáčením okolo osy C obrábět téměř pod jakýmkoli úhlem. Hlava má nevýhodu v nižší tuhosti a přesnosti způsobenou natáčením kolem další osy (Obr. 6).



Obr. 6) Univerzální hlava PAMA [7]

2.3.6 Lící deska

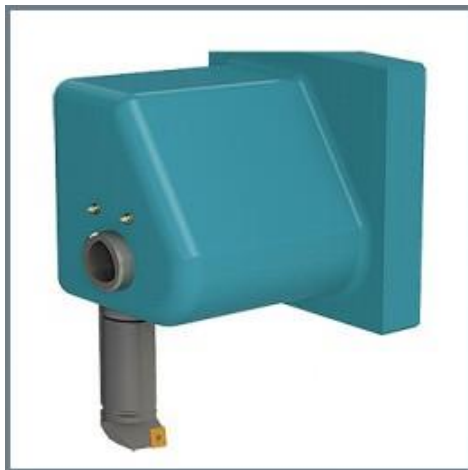
Tento typ speciální hlavy se používá pro soustružení velkých otvorů a čelní soustružení ploch, oproti běžnému soustružení se neotáčí obrobek, jak bývá zvykem, nýbrž je otáčen nástroj upnutý na lící desku na výsuvném a posuvném rameni (Obr. 7).



Obr. 7) Lící deska D'Andrea U-Tronic [8]

2.3.7 Nožové hlavy

Na nožovou hlavu je možno upnout jeden (Obr. 8 a), nebo více nožů (Obr. 8 b), jež je možné měnit manuálně, nebo automaticky, používají se u center s otočným stolem a karuselů.



Obr. 8) a) Nožová hlava PAMA [7] b) Nožová hlava s více noži Fermat [9]

3 TECHNICKÝ POPIS

3.1 Tělo obráběcí hlavy

Tělo je základem každé obráběcí hlavy, většinou se jedná o složitý odlitek, ve kterém je uložen pohon vřetena a osy kolmé k vřetení, její hlavní funkcí, je zamezit průniku nečistot z obráběcího prostoru do pohyblivých součástí, aby nedošlo k jejich nadměrnému opotřebení a případnému zadření těchto součástí. Jako je například tělo kolmé frézovací hlavy HPR 50 firmy TOS Varnsdorf (Obr. 9).



Obr. 9) Kolmá frézovací hlava HPR 50 [6]

3.2 Vřeteno

Vřeteno je bezpochyby jednou z nejdůležitějších součástí frézovacích hlav, neboť na tuhosti jeho uložení, které zajišťuje nástroji přesný rotační pohyb, tedy pohyb, při kterém se dráhy bodů nástrojů liší od kružnic, jen jak dovoluje tolerance, závisí přesnost obrábění [10].

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu vřeten je ocel, taková vřetena se vyznačují vysokou statickou tuhostí. Pro hlavy s vyššími otáčkami na vřeteni lze použít kompozitní materiály, taková vřetena jsou lehčí a s menším průřezem [1].

Neboť jsou vřetena velmi namáhána, je kladen důraz na jeho co možná nejjednodušší konstrukci s minimem změn průměrů. To záleží z pravidla na použitých ložiscích. Dalším aspektem je upevnění nástroje rychle, přesně, spolehlivě a s dostatečnou tuhostí. Toto upnutí je normalizováno, aby byla zajištěna kompatibilita s držáky nástrojů, které se do vřetena vkládají a upínají [10].

Další variantou je použití elektrovřeten, jež je možné měnit dle operace podle potřebného kroutícího momentu a otáček. Tato vřetena disponují vysokými otáčkami, a nízkým kroutícím momentem, čímž jsou vhodná hlavně na dokončovací operace [11].

Ve většině automatických upínacích systémů je využito síly pružin a hydrauliky, kdy hydraulická síla přetlačí sílu pružin a odepne nástroj po tom, co hydraulická síla přestane působit je nástroj upnut, jelikož pružiny vrátí kleštiny držící nástroj do upnuté polohy. Tento způsob upínání má výhodu v tom, že i při výpadku elektřiny nástroj nevypadne, jelikož není držen žádnou silou závislou na elektřině [12].

Tato upínání se dále dělí dle výrobců na základní 2 skupiny

- ISO, Big Plus – s kuželovitostí 7:24 (Obr. 10 a)
- HSK – s kuželovitostí 1:10 (Obr. 10 b)

V porovnání s ISO (Big Plus) nabízí kužel HSK kratší dobu výměny nástroje, neboť je o třetinu kratší než kužel ISO. Navíc dosahuje poloviční hmotnosti [13].



Obr. 10) a) ISO držák nástroje



b) HSK držák nástroje [14]

3.3 Uložení vřetena

Problematika uložení vřetena do těla obráběcí hlavy patří při návrhu k nejobtížnějším. Přímou totiž souvisí s přesností obrábění. Vzhledem k plánovanému využití obráběcího stroje lze uvažovat uložení kluzné, valivé nebo elektromagnetické. Přičemž kluzná a elektromagnetická uložení jsou využívána tehdy, budou-li kladeny vysoké nároky na tuhost systému nebo jeho maximální otáčky. V největší počtu aplikací (cca 90 %) jsou však využívána ložiska valivá. Mají velkou účinnost a jsou dostatečně spolehlivá [1].

V Tab 1) lze vidět příklady uspořádání ložisek vřeten pro různé operace, uložení se liší dle náročnosti, většinou jde o vysoce přesná ložiska s kosoúhlým stykem, která jsou speciálně navržena pro použití na vřetena.

Tab 1) Uložení vřeten vytvořené z radiálních kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem (oříznuto) [1]

Por. č.	Usporiadanie		$K_v = n_v \cdot d \cdot 10^4$ [mm·min ⁻¹]	Charakteristika	Použitie
	Zadný ložiskový uzol	Predný ložiskový uzol			
6.		$i_1=1, i_2=1$ $i_1=1, i_2=2$	0,4 – 0,9	– stredné axiálne zafaženie – veľmi častý spôsob použitia	– sústruženie – vrtanie
7.		$i_1=2, i_2=0$ $i_1=3, i_2=0$	0,3 – 0,6	– vysoké axiálne zafaženie – stredné radiálne zafaženie	– frézovanie – vyvrtávanie
8.		$i_1=1, i_2=1$ $i_1=2, i_2=2$	0,1 – 0,4	– vysoké radiálne zafaženie – vysoké axiálne zafaženie v oboch smeroch	– rovinné brúsenie – frézovanie

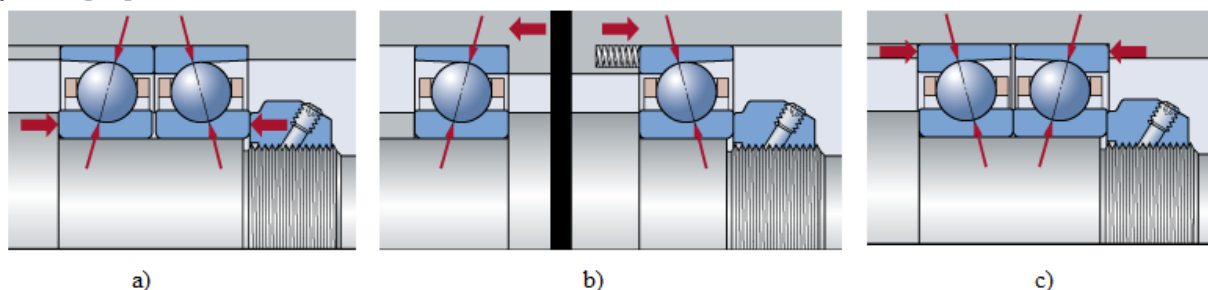
Ložiska s kosoúhlým stykem lze různě párovat do „O“, do „X“, nebo do tandemu dle (Obr. 11), tak aby byla zajištěna potřebná únosnost.

Spôsoby združovania	Združenie do „O“	Združenie do „X“	Združenie do „T“
Schéma zobrazenia ložiska			
Příklad označenia	7204B O	7204B X	7204B T
Vlastnosti	– veľká tuhosť proti naklopeniu – radiálne zafaženie prenášajú obidve ložiská – tzv. „tvarové“ usporiadanie umožňuje prenášať obojsmerné axiálne zafaženie	– malá tuhosť proti naklopeniu – radiálne zafaženie prenášajú obidve ložiská – tzv. „tvarové“ usporiadanie umožňuje prenášať obojsmerné axiálne zafaženie	– radiálne zafaženie prenášajú obidve ložiská – tzv. „smerové“ usporiadanie umožňuje prenášať jednosmerné axiálne zafaženie

Obr. 11) Sdružování ložisek do dvojic [1]

3.4 Předepnutí ložisek

V případě aplikací, jako je uložení vřetena obráběcího stroje, je vhodné využít předepnutí ložisek. Na správném předpětí (Obr. 12) závisí i správná funkce vřetenových ložisek. Mezi další výhody předepnutých ložisek patří vyšší trvanlivost, nižší hlučnost apod. Pro kuličková ložiska s kosoúhlým stykem je možné předepnutí pouze axiální. Při předpínání ložisek je ovšem nutné myslet i na teplotní roztažnost ložisek, u velkého množství strojů se čeká na provozní teplotu, aby se vymezily všechny vůle [15].



Obr. 12) Přepínání kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem: a) a c) pevné předpětí, b) předpětí pružinou [15]

3.5 Uložení otočné osy

Jelikož je osa vystavena jak axiálnímu, tak radiálnímu působení sil v závislosti na natočení hlavy je nutné použít ložisko, k zachycení sil ze všech směrů, klasická ložiska s kosoúhlým stykem by ovšem byla pro tyto rozměry moc velká. Na štěstí existují axiálně-radiální ložiska přímo pro toto využití, na příklad od firmy Schaeffler (Obr. 13).



Obr. 13) Axiálně-radiální ložisko firmy Schaeffler [16]

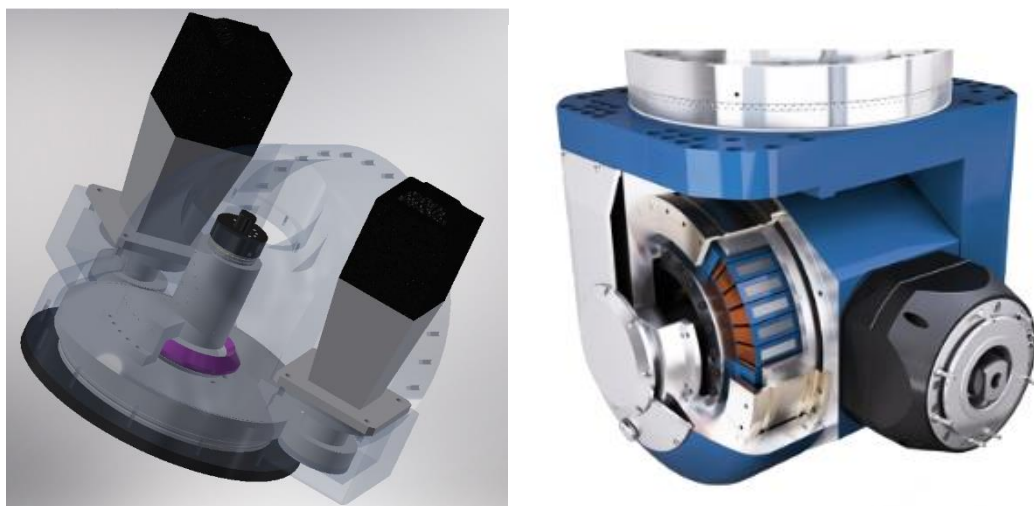
3.6 Možnosti pohonu osy B

Jako pohon osy B může být použito dvojice elektromotorů Master Slave (Obr. 14 a), šnekového převodu s externím pohonem, nebo momentového motoru jako frézovací hlava společnosti CyTec (Obr. 14 b).

Šnekový převod se v dnešní moderní době nepoužívá, neboť jeho efektivita je velice nízká a vyrobit předepnutý šnekový převod tak, aby v něm byla minimální vůle je nákladné.

Momentové motory jsou rozměrově vhodné například na polohování vidlicové hlavy, nebo C osy, ovšem u ortogonální hlavy použitím tohoto motoru pro polohování vede ke zvětšení rozměrů, tím pádem i snížení tuhosti celé hlavy a zvýšení nároků na pohon C osy z vřeteníku stroje. [1]

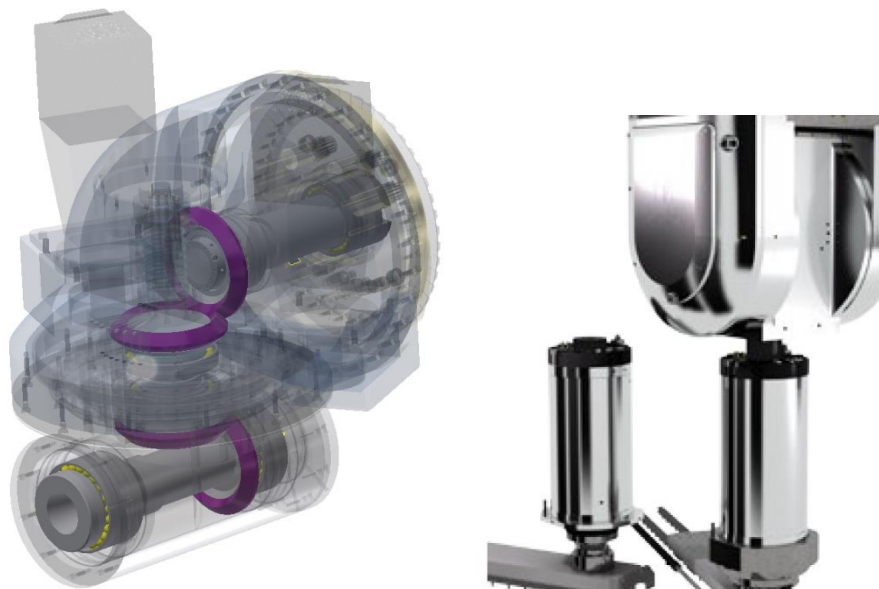
Jelikož kroutící momenty potřebné pro natáčení nejsou zrovna malé je třeba využít motory se zabudovanou převodovkou, ta sníží hmotnost motoru, zvětší jeho kompaktnost a zvýší jeho kroutící moment, jako například motory společnosti Stöber, kde jsou motory osazeny převodovkou s převodovým poměrem až 100:1 [17].



Obr. 14) a) Pohon osy koncepcí Master Slave b) Pohon osy momentovým motorem [11]

3.7 Možnosti pohonu nástroje

Nástroj může být hnán elektrovřetenem, nebo přes ozubená kola (Obr. 15 a) poháněná z vřeteníku. Elektrovřetena jež je možné vyměnit podle potřebných otáček a kroutcích momentů (Obr. 15 b), jsou spíše určena k finálním úpravám povrchu než k hrubování, kde se odebrává velká tříska, v tom případě jsou pro těžké výrobní stroje nepoužitelné, neboť tyto stroje se využívají zejména k hrubování. Proto se u těžkých výrobních strojů využívá pohon nástroje přes ozubená kola od vřeteníku, ten zajišťuje velký kroutcí moment a vysoké otáčky převedené na nástroj.



Obr. 15) a) Náhon kuželovými ozubenými koly b) Výměna elektrovřetena vidlicové hlavy firmy CyTec [11]

3.8 Ozubení

V obráběcích hlavách se hojně využívají ozubení kuželová k kola k převodu kroutcího momentu od vřetene k nástroji. Obzvláště je-li osa nástroje rovnoběžná s osou vřetene a je-li osa na víc ještě otočná je tento typ ozubení nejvhodnější.

Kuželová kola mají několik variant tvaru zubů, mohou být přímé, šikmé, kruhové (Gleason), paloidní (Klingelberg), eloidní (Oerlikon), nebo spirální. [18]

Přímé zuby se nepoužívají zejména z důvodu jejich hlučnosti a nežádoucím rázům, ke kterým u nich dochází.

Pro pohon osy samotné lze použít čelní soukolí se šikmými zuby.

3.9 Periferie

Periferie vřeteníku slouží k tomu, aby tento uzel obráběcího stroje umožňoval dosáhnout požadovaných technických parametrů a parametrů potřebných pro požadovanou technologii [1].

3.9.1 Mazání

Mazivo na třecích (ozubení) a valivých plochách (ložiska) snižuje tření namáhaných součástí a tím snižuje teplotu jednotlivých komponent, jejich opotřebení a zabraňuje jejich zadrhnutí, snižuje hlučnost a prodlužuje životnost stroje.

Základní dělení je na plastická maziva (tuky) a oleje. Tuky jsou většinou využívány na mazání s jednorázovou náplní, oleje jsou používány k mazání oběhovému, tato maziva lze přefiltrovat od nečistot a používat stále dokola na rozdíl od plastických maziv která přefiltrovat nelze.

Jaké mazivo bude na ložisko použito a v jakém množství určuje výrobce. K mazání ložisek frézovacích hlav se používají většinou mazací tuky, které se mění při generálních opravách [1][19].

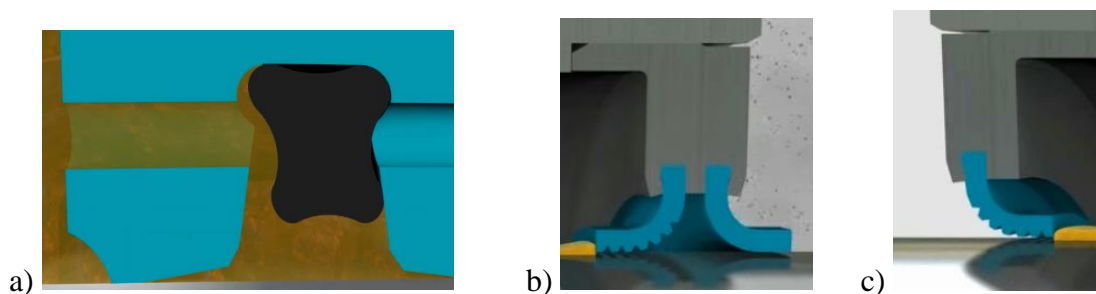
3.9.2 Chlazení

Udržování stálé teploty je zejména pro obráběcí stroje velmi důležité, aby bylo obrábění, co nejpřesnější. Chlazení je možné realizovat cirkulací oleje, nebo oběhem chladicí kapaliny přes teplotně namáhané součásti, která je externě ochlazována. Hlavním úkolem chlazení je odvádět teplo z obráběcího prostoru a zabránit přehřátí namáhaných komponent a snížit vliv teplotní dilatace. Aby se předešlo ohřívání součástí, je vhodné umístit motory, převodovky a jiné zdroje tepla mimo stroj, pokud je to možné. Kromě olejů a chladících kapalin je možné chladit vzduchem, nebo směsí oleje a vzduchu [1][19].

3.9.3 Těsnění

Úkolem těsnění je eliminovat průchod nečistot z obráběcího prostoru k ložiskům a zároveň uchovat mazivo v prostoru u ložisek.

Těsnění se dělí na bezkontaktní a kontaktní. Kontaktní těsnění disponují břitem, který se dotýká rotující součásti, mezi součásti a touto čepelí se důsledkem tření generuje teplo. Obzvláště pokud je použito těsnění pryžové, jež časem degraduje a ztvrdne, existují však těsnění, která mají nízký koeficient tření, neboť disponují teflonovou vrstvou. Problém se třením nastává u obráběcích hlav zejména u převodu kapalin, kde je velké množství těsnění na jednom hřídeli. Je proto vhodné volit těsnění s malým koeficientem tření jako například, Turcon Roto Glyd Ring V (Obr. 16 a), pro těsnění na vřetení Turcon Varilip PDR Type D (Obr. 16 b) a k těsnění ložisek Turcon Varilip PDR Type A (Obr. 16 c) od firmy Trelleborg [20].



Obr. 16) a) Těsnění pro rotační přírady b) Těsnění obráběcího prostoru c) Těsnění ložisek [20]

3.9.4 Indexování

Odměrování polohy natočení osy je důležité pro maximální využití obráběcí hlavy. Signál ze snímače je přenášen do řídicího systému stroje, což je vhodné například tehdy, nachází-li se ložisko na otáčecích komponentech hlavy.

Základní dělení odměrování je na nepřímé a přímé. Nepřímé odměrování je založeno na snímání polohy pohybového mechanismu (např. enkodér na motoru). Výhodou je jednodušší konstrukce, nevýhodou pak náchylnost systému k chybám způsobeným tepelnými dilatacemi a všemi nepřesnostmi jednotlivých součástí. Tyto nevýhody eliminuje odměrování přímé, kdy jsou odměřovací prvky přímo spojeny s pohybuujícími se částmi stroje (Obr. 17). Tím je odměrování sice přesnější, avšak celý systém je složitější a tím dražší.

Další možné dělení je podle informace o poloze. Ta může být určována relativně nebo absolutně. Relativní odměrování spočívá v odečítání polohy od jedné známé, zvané referenční. Po každém zapnutí stroje je nutné, aby osa najela na referenční polohu. Absolutní odměrování používá kódový prvek (pravítko, kotouč), ze kterého snímač odečítá skutečnou polohu, aniž by bylo nutné najíždět na referenci, z toho důvodu nehrozí kolize a také je start stroje rychlejší [21].



Obr. 17) Odměrování na axiálně-radiálním ložisku firmy Schaeffler [16]

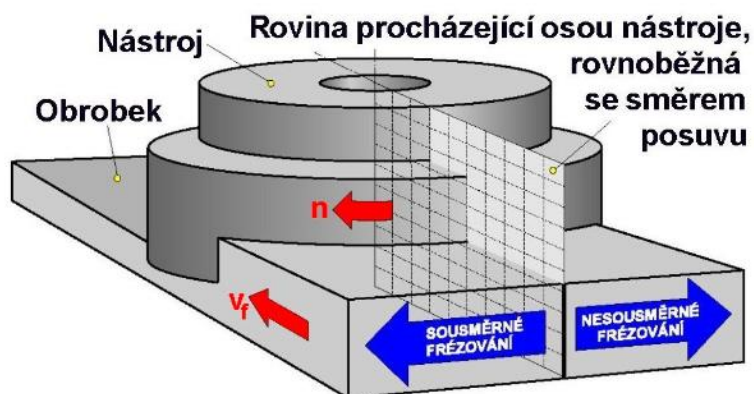
4 TECHNOLOGICKÉ OPERACE

4.1 Frézování

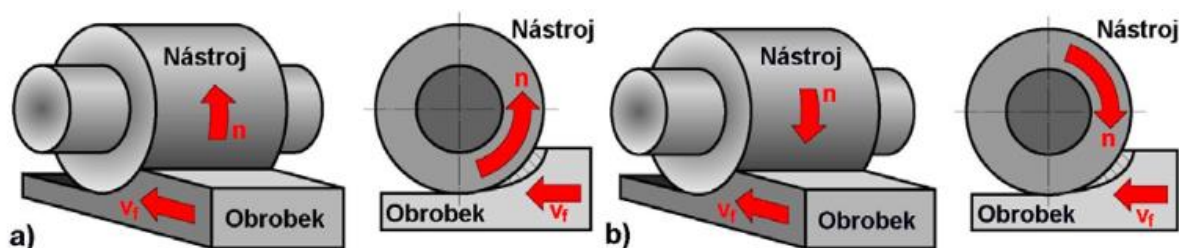
Je metoda více břitového třískového obrábění, při kterém rotuje fréza a obrobek se zpravidla pohybuje translačním pohybem ve směru kolmém k nástroji u stolových obráběcích center a CNC frézek, se může pohybovat všemi směry, u portálových obráběcích center koná nástroj rotační i translační pohyb. Každý zub frézy odebírá různou délku třísky, díky tomu, že proces obrábění není plynulý dochází k rázům, tím pádem jsou kladeny velké nároky na tuhost vřetene, v němž je nástroj upnut.

Dělí se na frézování:

- čelní, úběr materiálu je realizován čelem frézy, rotuje-li nástroj směrem shodným s posuvem obrobku, jedná se frézování sousledné, v opačném případě jde o frézování nesousledné (Obr. 18).
- válcové materiál je odebírán obvodem frézy, dělí se na nesousledné (Obr. 19 a) a sousledné (Obr. 19 b), analogicky dle frézování čelního [22].



Obr. 18) Čelní frézování [22]



Obr. 19) Válcové frézování [22]

4.2 Vrtání

Vrtání slouží k vytváření otvorů do plného materiálu, stejně jako při frézování, koná rotační pohyb vrták a translační pohyby většinou koná nástroj, jako je tomu u radiální vrtačky (Obr. 20), pohyb obrobku není tak častý. Jako řezná rychlost se uvažuje obvodová rychlost vrtáku, jelikož se rychlost směrem ke středu snižuje a v ose vrtáku je nulová.

Pro dosažení přesnějších tolerancí tvaru a polohy, je nutné tyto otvory ještě vyhrubovat, nebo vystružit [23].



Obr. 20) Radiální vrtačka Kovosvit MAS VO 32 [24]

5 SYSTÉMOVÝ ROZBOR

Obráběcí stroj je chápán ze systémového hlediska jako soustava Stroj-Nástroj-Obrobek.

Při výrobě stroje se musí dbát na požadavky několika hledisek:

- Zákazník (cena)
- Výroba (technologické postupy, materiály)
- Legislativa (dodržení platných norem)

Při návrhu obráběcího stroje musí brát konstruktér v potaz následující faktory:

- Náročnost technologických procesů
- Legislativa a normy pro daný typ stroje
- Ekonomika (náklady na vývoj a výrobu)
- Ekologická likvidace po konci životnosti
- Nenáročná montáž a demontáž příslušenství, výměnných komponent a jejich kompatibilita se zbylými částmi stroje
- Jednoduchý servis a údržba

Jedná se o obsáhlou množinu technických, legislativních ekonomických a ekologických vlivů, které je nutné dodržet, aby později nenastaly potíže, pro výrobce, nebo pro uživatele.

Při návrhu je nutné myslet i na proces samotný, kde vstupuje materiál a obrobením z materiálu vzniká obrobek, aby tomu tak mohlo být musíme do soustavy

přivést ještě:

- Vzduch
- Elektrickou energii
- Olej
- Řeznou kapalinu
- Teplo
- Konvekce
- Radiace

a vzniká odpad ve formě:

- Zplodin
- Olejové mlhy
- Záření
- Tepla
- Špon
- Olejů
- Řezné kapaliny

5.1 Problémová situace

Při návrhu kontinuálně natáčené obráběcí hlavy je důležité vybrat správnou kinematiku, která zajistí co nejvyšší přesnost a tuhost při frézování a vrtání.

Míra tuhosti a přesnosti patří mezi nejdůležitější požadavky zákazníků při koupi nového stroje. Správně zvolenou kinematikou lze dosáhnout co nejlepší výsledné tuhosti a přesnosti obráběcí hlavy.

5.2 Formulace problému

Nejprve je nejdůležitější zvolit správnou kinematiku pro obráběcí hlavu s osou natáčení kolem osy B. Po zvolení kinematiky následují návrhové konstrukční řešení jednotlivých uzlů. V tomto případě se jedná o automatické upnutí a uvolnění nástroje pro jeho automatizovanou výměnu, polohování natáčené osy a pohon samotného nástroje.

5.3 Formulace cílů řešení

Cíle diplomové práce:

- Výběr kinematiky stroje
- Návrh uložení vřetene
- Návrh polohování osy
- Potřebné výpočty
- Závěr a shrnutí

5.4 Popis řešení soustavy

Praktická část této práce se zabývá tvorbou 3D modelu obráběcí hlavy a zahrnuje i pro jeho návrh nezbytné výpočty, návrh uložení vřetene a výpočet trvanlivosti ložisek.

6 KONSTRUKČNÍ VARIANTY

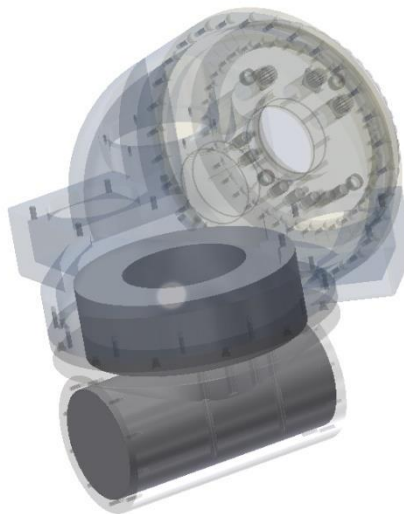
Na základě provedené rešerše byly vytipovány základní varianty pohonu osy B a vřetene frézovací hlavy, ty budou vzájemně porovnány s využitím metody pořadí. Bude tedy nutné stanovit kritéria, na jejichž základě si zákazník tento produkt vybere a umožní tak zvolit optimální verzi, ta bude dále rozpracována. Výstup pak bude realizován 3-D CAD modelem a výkresovou dokumentací.

Vychází 6 konstrukčních variant

- Elektrovřeteno-momentový motor
- Elektrovřeteno-šnekový převod
- Elektrovřeteno-Master Slave motory
- Kuželové soukolí-momentový motor
- Kuželové soukolí -šnekový převod
- Kuželové soukolí -Master Slave motory

6.1 Varianta 1

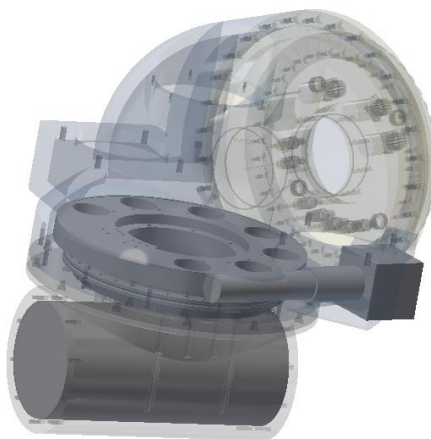
Toto řešení obsahuje minimum dílů a je tedy konstrukčně nejméně náročné. Momentový motor spojený s axiálně-radiálním ložiskem zajišťuje velký rozsah a jemné indexování při natáčení, jeho rozměry a hmotnost jsou jedinou nevýhodou tohoto pohonu osy. Elektrovřetena disponují malými rozměry, lze je umístit do tubusu hlavy kde je zajištěno jeho upnutí a napájení (Obr. 21).



Obr. 21) Kombinace momentového motoru a elektrovřetena

6.2 Varianta 2

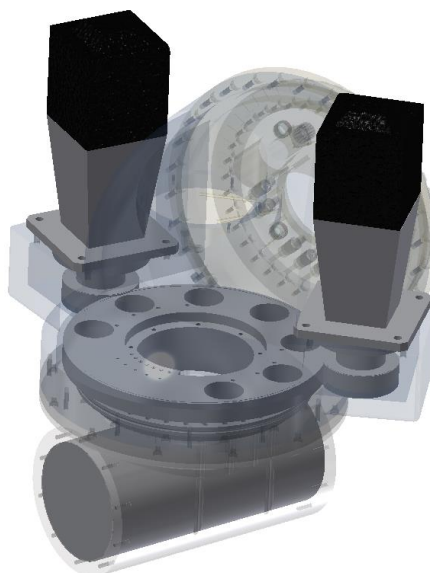
Kombinace elektrovřeten a šnekového převodu (Obr. 22) k pohybu osy kolmé k nástroji je z mého pohledu vhodná spíše k repasování starých strojů, neboť u nových obráběcích hlav se tento pohon osy již nepoužívá, na druhou stranu má výhodu v tom, že motor zabírá pouze malý prostor. Použití elektrovřeten má i zde stejné vlastnosti jako u předchozí varianty. Kdyby bylo třeba lze hlavu otáčet o 360°, neboť se zde nenachází žádný prvek, který by natočení omezoval.



Obr. 22) Kombinace šnekového převodu a elektrovřeten

6.3 Varianta 3

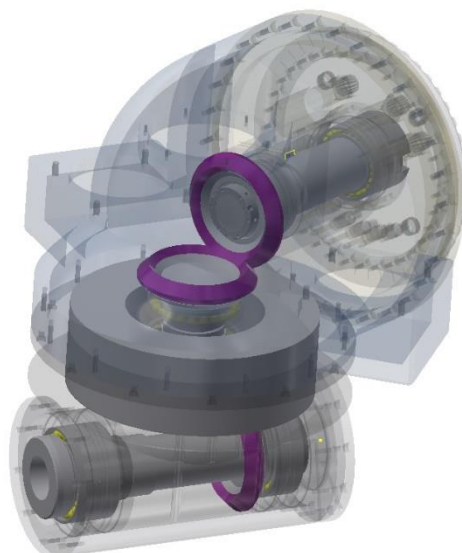
Použití motorů Master Slave a elektrovřeten (Obr. 23) je hodně podobná variantě s momentovým motorem, jsou-li použity motory s brzdou není nutné, aby byly při aretaci hlavy stále pod proudem, což je velká výhoda oproti momentovému motoru. Zvolené motory s převodovkou ční nad tělo obráběcí hlavy, což nemá vliv na obrábění a snižuje vzdálenost os nástroje a vřeteníku.



Obr. 23) Kombinace motorů Master Slave a elektrovřeten

6.4 Varianta 4

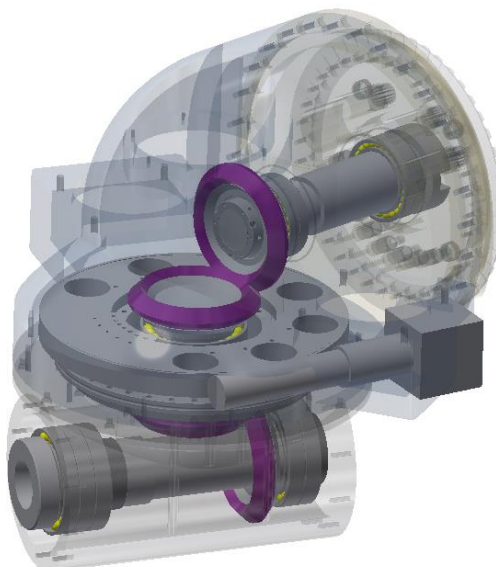
U variant s kuželovým soukolím, dochází k omezení otáčení hlavy, z důvodu převodu médií, které by pak mohlo kolidovat s kuželovým soukolím. Kuželové soukolí je náročnější na konstrukci, je však nutností, pokud má být hlava určena k hrubování na těžkých obráběcích strojích. Momentový motor zvětšuje vzdálenost os vřeteníku a nástroje, ta by měla mít co nejmenší rozměr (Obr. 24).



Obr. 24) Kombinace momentového motoru a kuželového soukolí

6.5 Varianta 5

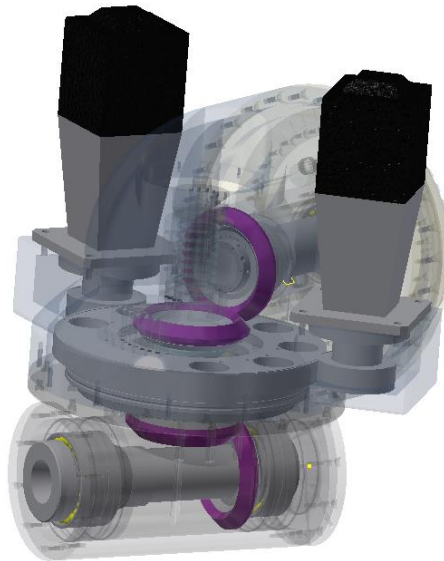
Šnekový převod, jak již bylo zmíněno výše, je archaický a náročný na výrobu. Tato koncepce (Obr. 25) s kuželovým soukolím by byla krokem zpět, jelikož se využívala již dříve.



Obr. 25) Kombinace šnekového převodu a kuželového soukolí

6.6 Varianta 6

Varianta kuželového soukolí a pohonu osy motory Master Slave, má malou vzdálenost os vřeteníku a nástroje, nízkou energetickou náročnost pro motory s brzdou viz (Obr. 26).



Obr. 26) Kombinace motorů Master Slave a kuželového soukolí

7 VÝBĚR NEJVHODNĚJŠÍ VARIANTY

K výběru nejvhodnější konstrukční metody byla zvolena metoda pořadí pro její jednoduchost a názornost.

Pro co nejobektivnější výsledek této metody, je nutné vzít se do kůže zákazníka, podle kterých kritérií si obráběcí hlavu vybírá a seřadíme je dle důležitosti, tu jsme schopni určit, nejsme však schopni určit, jak moc je první kritérium důležitější než druhé kritérium.

7.1 Postup při výběru varianty metodou pořadí

Parametry jsou seřazené v Tab 2) podle důležitosti v řádcích a ve sloupcích jsou jednotlivé kombinace pohonu nástroje a B osy, zde už jde jen o to, přiřadit váhu každé kombinaci pohonů vzhledem k danému parametru (hodnota 1-5, kde 1 znamená nejhorší a 5 nejlepší).

Tab 2) Vícekritériální hodnocení návrhu ortogonální hlavy

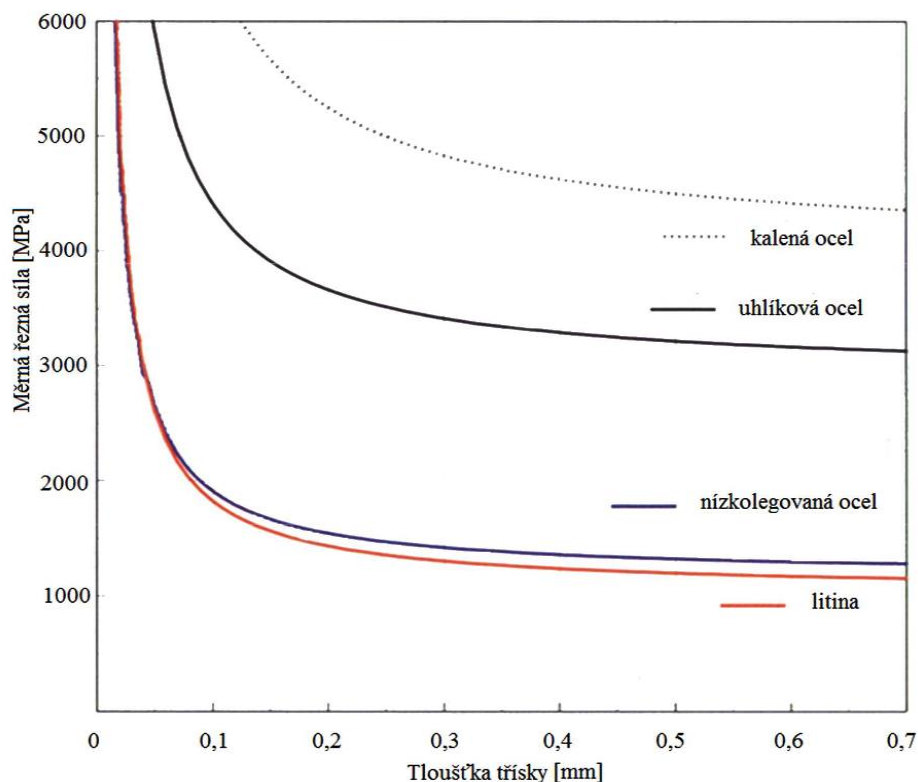
Náhon	Váha	Konstrukční varianty					
		Elektrovřetenem			Ozubenými koly		
Natáčení hlavy		Momentovým motorem	Šnek. Převodem	Master-slave motory	Momentovým motorem	Šnek. Převodem	Master Slave motory
Rozměry	7	2	3	4	3	4	5
Cena	6	1	2	4	2	3	5
Max. Mk	5	1	1	1	5	5	5
Max. otáčky	4	5	5	5	4	4	4
Chlazení	3	2	4	4	3	5	5
Údržba	2	3	2	4	4	3	5
Snadná montáž	1	2	3	4	2	3	4
Celkové hodnocení		59	77	101	93	111	135

Z uvažovaných variant vychází nejlépe šestá varianta. Polohování v ose B je řešeno Master Slave motory a osazením přímého snímače úhlového natočení na axiálně radiálním ložisku a pohyb nástroje je převáděn z vřeteníku přes kuželová soukolí. Další vhodná varianta je šnekový převod a kuželové soukolí, což je časem ověřená koncepce.

8 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

Ke správnému návrhu všech a funkci všech komponent musí být nejprve známo zatížení od obrábění, ze kterého je možné určit zatížení ložisek, ozubení, motorů a hřídelů. Hlava bude sloužit k technologickým operacím zmíněným v předchozí kapitole.

Obráběcí hlava, bude sloužit hlavně k hrubování obrobků z uhlíkové oceli, jejíž měrná řezná síla je určena v závislosti na tloušťce třísky na (Obr. 27). Jelikož se nejedná o žádný lehký kov, budou na uložení vřetene kladeny velké nároky obzvláště na jeho tuhost. Aby bylo možné určit zatížení je nutné určit síly od jednotlivých operací působících na podpory (ložiska) na vřetení pro obrábění oceli. Z těchto operací se dále určí nejnáročnější operace a dle ní se spočítají reakce v podporách.



Obr. 27) Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [25]

8.1 Vstupní parametry

- Trvalé maximální otáčky: 6000 /min
- Maximální kroutící moment: 2000 Nm
- Převod kapalin pomocí rychlospojek
- Hydraulické upínání hlavy na vřeteník
- Aretace na vřeteník pomocí Hirthova věnce
- Dále je standartní výbavou upínací kužel ISO 50 a automatické hydraulické upínání nástroje.

8.1.1 Frézování

Jako první operace pro zjištění obráběcích sil a z nich zatížení ozubení a ložisek bude asi nejčastěji využíváné frézování. Pro tuto operaci, byla vybrána fréza společnosti SECO R220.21-06.00-ON09-10 (Obr. 28) s maximálním obráběcím průměrem 162,3 mm. Fréza disponuje širokou škálou kompatibilních břitových destiček, tím pádem je možné obrábět různé materiály, centrálním otvorem pro průchod řezné kapaliny a velkým rozsahem řezných podmínek.



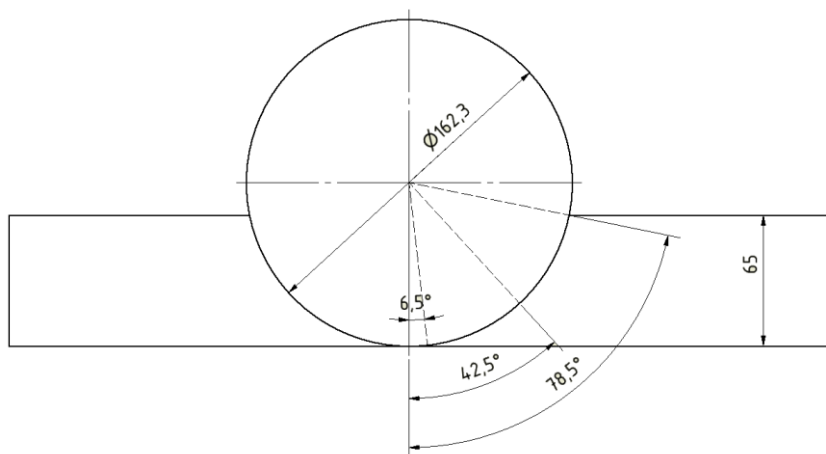
Obr. 28) Fréza SECO R220.21-06.00-ON09-10 [26]

V Tab 3) jsou uvedeny potřebné parametry k danému nástroji a obráběcím podmínkám pro následující výpočty.

Tab 3) Parametry frézy SECO SD602-139/140-90RG [26]

průměr	D_c [mm]	162
počet zubů	z	10
řezná rychlost	v_c [m/min]	50
posuv na zub	f_z [mm]	0,75
šířka záběru	a_e [mm]	80
hloubka řezu	a_p [mm]	2,0
úhel hlavního ostří	κ_r [°]	90
úhel opásání	Ψ_{max} [°]	80,0

Nejprve je nezbytné zjistit počet zubů v záběru a rozteč mezi nimi. Pokud má fréza 10 řezných destiček, rozmístěných pravidelně, je úhlová vzdálenost mezi jednotlivými zuby 36° , tyto úhly jsou znázorněny na (Obr. 29).



Obr. 29) Rozteč zubů v záběru při frézování

Stanovení počtu zubů v záběru:

$$z_e = \frac{z \cdot \psi_{\max}}{360} = 2,22 \quad (1)$$

Jelikož je počet zubů vždy celé číslo, je nutné provést zaokrouhlení nahoru, a proto $z_e=3$.

Pro určení celkové řezné síly F_c je nutné vypočítat jmenovitý průřez třísky pro všechny tři zuby v záběru. Nejprve je nutné zjistit jmenovitou šířku třísky b , která je konstantní (nezávisí tedy na natočení frézy).

$$b = \frac{a_p}{\sin(\kappa_r)} = 2 \text{ mm} \quad (2)$$

Dalším krokem je výpočet dílčích tloušťek třísek. Ty už závisí na natočení nástroje (Obr. 29). Využit je následující vztah:

$$h_i = f_z \cdot \sin(\varphi_i) \cdot \sin(\kappa_r) \quad (3)$$

Poté lze přikročit k výpočtu průřezů třísek:

$$A_{Di} = b \cdot h_i \quad (4)$$

Hodnoty tloušťky třísky a jejího průřezu pro každý zub v záběru jsou uvedeny v Tab.

Velikosti dílčích řezných sil je možno určit s využitím vztahu:

$$F_{ci} = A_{di} \cdot K_{ci} = A_{di} \cdot \frac{k_{c1}}{h_i^{m_c}} \quad (5)$$

kde exponent m_c udává vliv tloušťky třísky na měrný řezný odpor (jeho hodnota je pro ocel 0,25) a k_{c1} má dle (Obr. 27) hodnotu 3000 MPa

Tab 4) Vypočtené dílčí hodnoty řezných sil [22]

Úhel zubu	$\phi [^\circ]$	6,5	42,5	78,5
Jmenovitá tloušťka třísky	h_i [mm]	0,735	0,507	0,085
Jmenovitý průřez třísky	A_d [mm ²]	2,94	2,03	0,34
Řezná síla	F_c [N]	4763	3603	944

Výsledná tečná řezná síla se určí jako součet všech jednotlivých složek.

$$F_c = \sum_{i=1}^3 F_{ci} = 9310 \text{ N} \quad (6)$$

Pokud je známa velikost řezné síly, je možné určit výkon potřebný pro obrábění.

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = 7,8 \text{ kW} \quad (7)$$

Krouticí moment na vřetenu lze vypočítat pomocí: [22]

$$M_k = F_c \cdot \frac{D_c}{2} = 302 \text{ Nm} \quad (8)$$

Hodnota radiální složky řezné síly se určí následovně:

$$F_p = 0,9 \cdot F_c = 8379 \text{ N} \quad (9)$$

Důležité je znát i hodnotu axiální síly, která se určí podle vztahu [27]:

$$F_a = 0,25 \cdot F_c = 3724 \text{ N} \quad (10)$$

Poslední důležitou hodnotou jsou otáčky nástroje:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D_c} = 98 \text{ min}^{-1} \quad (11)$$

8.1.2 Vrtání

Další operací, která je pro návrh hlavy uvažována, je vrtání. Vrtání do plného materiálu karbidovým vrtákem SECO SD265A-16.009-62-16R1 (Obr. 30) o průměru 16 mm a dvěma řeznými břity, jehož hlavní předností je možnost obrábět rozmanité materiály.



Obr. 30) Karbidový vrták SECO SD265A-16.009-62-16R1 [26]

V Tab 5) jsou uvedeny potřebné parametry k danému nástroji a obráběcím podmínkám pro následující výpočty

Tab 5) Parametry Karbidového vrtáku SECO SD265A-16.009-62-16R1 [26]

průměr	D_c [mm]	16
řezná rychlost	V_c [m/min]	105
posuv	f [mm/ot]	0,34
úhel hlavního ostří	K_{re} [°]	70
úhel čela	γ_0 [°]	30

Prvním krokem je stanovení jmenovité šířky třísky b .

$$b = \frac{D_c}{2 \cdot \sin(\kappa_{re})} = 8,51 \text{ mm} \quad (12)$$

Následuje určení jmenovité tloušťky třísky h .

$$h = \frac{f}{2} \cdot \sin(\kappa_{re}) = 0,16 \text{ mm} \quad (13)$$

Dalším v pořadí je výpočet jmenovitého průřezu třísky A .

$$A_D = b \cdot h = 1,36 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

Pro stanovení řezné síly F_c je nutné určit hodnotu posuvu na zub f_z .

$$f_z = 0,5 \cdot f = 0,17 \text{ mm} \quad (15)$$

Měrnou řeznou sílu zjistíme z grafu na (Obr. 27) na začátku této kapitoly. Kde tloušťka třísky je rovna posuvu.

$$k_{c2} = 3250 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (16)$$

Nyní jsou již známy všechny potřebné hodnoty pro stanovení řezné síly F_c .

$$F_c = 2 \cdot A_D \cdot k_{c2} = 8840 \text{ N} \quad (17)$$

Pokud je známa velikost řezné síly F_c , je možné určit velikost potřebného výkonu pro úběr třísky.

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{2 \cdot 6 \cdot 10^4} = 7,7 \text{ kW} \quad (18)$$

Z průměru nástroje a velikosti řezné síly je možné stanovit krouticí moment M_k .

$$M_k = F_c \cdot \frac{D_c}{2} = 70,7 \text{ Nm} \quad (19)$$

Otáčky nástroje lze zjistit z následujícího vztahu:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D_c} = 2089 \text{ min}^{-1} \quad (20)$$

Důležitá je i hodnota posuvové síly F_f , kterou lze určit z [23]:

$$F_f = 0,5 \cdot k_c \cdot 0,5 \cdot D_c \cdot f \cdot \sin(\kappa_{re}) = 4153 \text{ N} \quad (21)$$

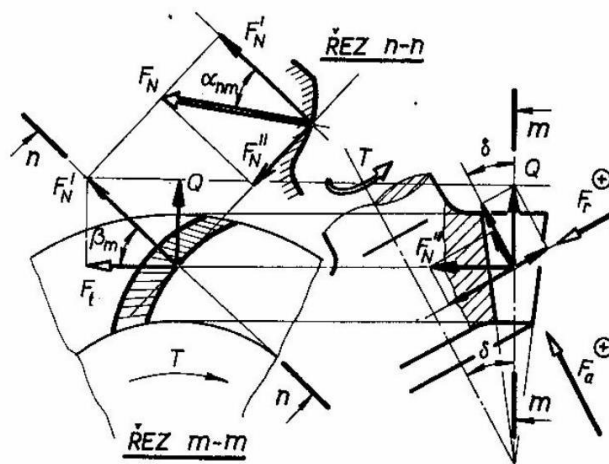
8.1.3 Návrh kuželového soukolí

Pro přenos výkonu ze vstupní hřídele na vřeteno bude sloužit kuželové soukolí. Toto soukolí je zároveň velmi vhodné i v souvislosti s natáčením frézovací hlavy, při natáčení hlavy dochází k malému pohybu nástroje unášivou rychlostí. Výhodou použití ozubených kol je přenos velkých zatížení i odolnost proti rázům vznikajících při obrábění.

Pro navrhovanou frézovací hlavu byla zvolena kola s poloidním ozubením tzv. Klingenbergova kola s parametry v Tab 6) a rozložením sil dle (Obr. 31) Výhodou oproti jednodušším kolům s přímými nebo šikmými zuby je vyšší účinnost, plynulejší záběr a tím i menší hlučnost při vyšších otáčkách [18].

Tab 6) Parametry kuželového soukolí [18]

Úhel sklonu zubu	β_m [°]	35
Úhel záběru	α_t [°]	20
Úhel roztečného kužele kolo 1	δ_1 [°]	45
Úhel roztečného kužele kolo 2	δ_2 [°]	45
Průměr roztečné kružnice	D_1 [mm]	160



Obr. 31) Rozložení sil na kole se zakřivenými zuby [18]

K následujícím výpočtům jsou použity hodnoty z frézování, jejichž velikosti jsou větší než u vrtání.

Tečná síla

$$F_t = \frac{2 \cdot M_k}{D_1} = 3972 \text{ N} \quad (22)$$

Axiální síla od kola 1 (hnací)

$$F_{a1} = \frac{F_t \cdot (\sin(\delta_1) \cdot \tan(\alpha_{nm}) + \cos(\delta_1) \cdot \sin(\beta_m))}{\cos(\beta_m)} \quad (23)$$

$$= 3048 \text{ N}$$

Axiální síla od kola 2 (hnané)

$$F_{a2} = \frac{F_t \cdot (\sin(\delta_2) \cdot \tan(\alpha_{nm}) - \cos(\delta_2) \cdot \sin(\beta_m))}{\cos(\beta_m)} \quad (24)$$

$$= -886 \text{ N}$$

Radiální síla kola 1 (hnací)

$$F_{r1} = \frac{F_t \cdot (\sin(\delta_1) \cdot \tan(\alpha_{nm}) - \cos(\delta_1) \cdot \sin(\beta_m))}{\cos(\beta_m)} \quad (25)$$

$$= -886 \text{ N}$$

Radiální síla od kola 2 (hnané) [18]

$$F_{r2} = \frac{F_t \cdot (\sin(\delta_2) \cdot \tan(\alpha_{nm}) - \cos(\delta_2) \cdot \sin(\beta_m))}{\cos(\beta_m)} \quad (26)$$

$$= 3048 \text{ N}$$

Smysl otáčení kola a vinutí šroubovice jsou stejná, proto platí v předchozích rovnicích znaménka + a – podle zvoleného pořadí. Záporné znaménka u výsledných sil znamená, že je skutečná síla opačného směru, než který byl zvolen.

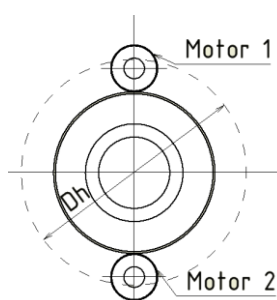
Tímto způsobem lze vypočítat z kroutícího momentu axiální a radiální složku síly působící na ozubené kolo, což umožní výpočet dalších sil, působících v podporách a dále je lze využít k návrhu ložisek [18].

8.1.4 Návrh motorů pro pohon B-osy

Pro otáčení B-osy byla zvolena varianta Master-Slave, kde jsou použity dva motory. Z důvodu vymezení vůle (Obr. 32), tyto motory mají opačný směr otáčení, master je motor určující směr otáčení a slave sekundární motor má opačný směr otáčení, aby vymezil vůli 30% výkonu primárního motoru.

Tab 7) Parametry pro návrh motorů

Převodový poměr	$i_p [-]$	3,5
Účinnost převodu	$\eta_p [-]$	0,97
Účinnost válečkového ložiska	$\eta_v [-]$	0,97
Průměr, který obíhá konec nástroje	$D_h [m]$	0,6
Počet ložisek	$i [-]$	1



Obr. 32) Uspořádání motorů

Výpočet kroutícího momentu potřebného k pootočení osy při maximálním úběru třísky

$$M_{km} = \frac{2 \cdot F_p}{D_h} \cdot \frac{1}{i_p \cdot \eta_p \cdot \eta_v} = 339 \text{ Nm} \quad (27)$$

Tab 8) Parametry motoru EZ701U s převodovkou P822 [17]

Výstupní otáčky	$n_m [\text{min}^{-1}]$	43
Převodový poměr převodovky	$i_m [-]$	70
Jmenovitý kroutící moment	$M_{2N} [\text{Nm}]$	492
Max. akcelerační kroutící moment	$M_{2acc} [\text{Nm}]$	1600
Max. brzdící kroutící moment	$M_{2NOT} [\text{Nm}]$	2800
Hmotnost	$m_m [\text{kg}]$	37

Jmenovitý kroutící moment motoru (Obr. 33) je vyšší než kroutící moment potřebný k pootočení osy, motor tedy bude schopen pootočit osou a zároveň je vyšší i brzdící moment, osa se tedy nebude natáčet v aretované poloze.



Obr. 33) Synchronní motor s převodovkou firmy Stöber [17]

8.2 Návrh vřetena

Vřeteno frézovací hlavy je bezesporu jedna z nejdůležitějších a nejnamáhanějších součástí, jsou na něj proto kladeny velmi vysoké nároky. Vřeteno určuje, s jakou přesností bude nástroj obrábět. Proto je nutné věnovat pozornost návrhu jeho uložení. Ložiska vřetene zachycují veškeré síly vznikající při obrábění. Je nutné tedy stanovit jejich trvanlivost, která se spočítá z ekvivalentního dynamického zatížení.

8.2.1 Materiál vřetena

Volba materiálu závisí hlavně na požadované funkci vřetena a jeho zatěžování. Výrobci automatického upínání nástroje požadují pro správnou funkci upínače, aby byla dutina vřetena odolná proti opotřebení. Tvrdý povrch je vyžadován také pro čelní část vřetena, která je vystavena všem vnějším vlivům působícím jak při obrábění, tak při manipulaci s frézovací hlavou. Materiál musí však být zároveň dostatečně houževnatý, aby byl schopen tlumit rázy vzniklé při obrábění.

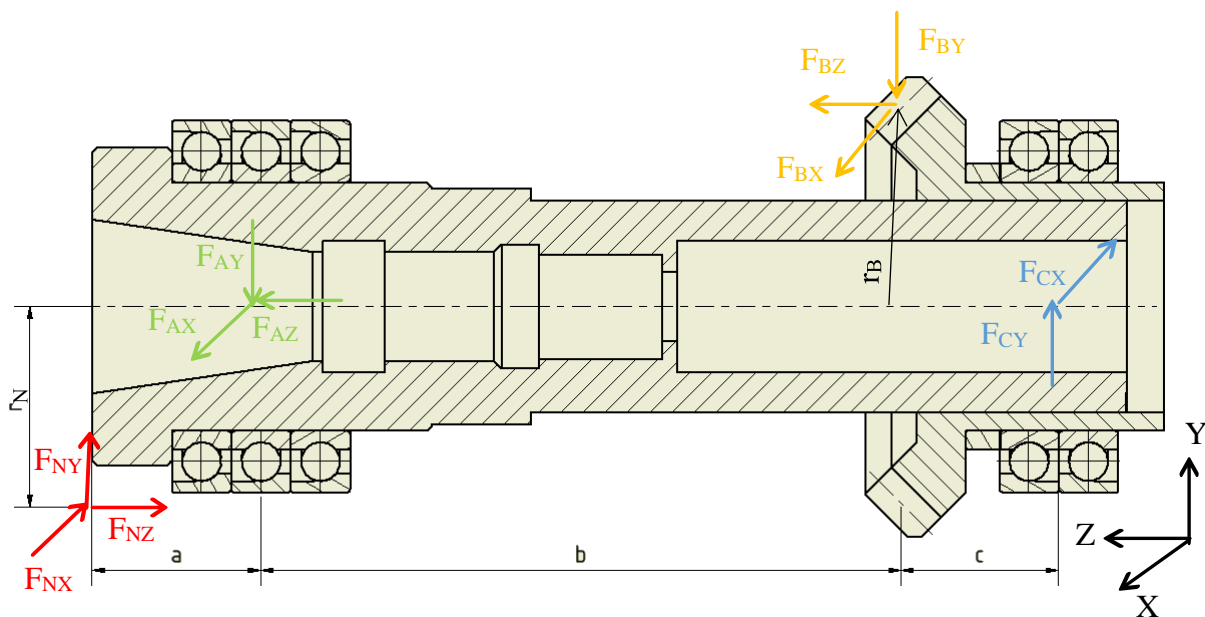
Pro tyto účely byl zvolen materiál 14 220 který je hojně používán pro strojní součásti vhodné k cementování. Je zde využito velmi tvrdého povrchu po zakalení při současném zachování houževnatého jádra.

Tab 9) Parametry oceli 14 220 [28]

Mez pevnosti	$R_m = 640 \text{ Mpa}$
Minimální mez kluzu	$R_e = 440 \text{ Mpa}$
Chemické zpracování	Cementováno do hloubky 0,8 mm
Teplné zpracování	Kaleno na $58 \pm 2 \text{ HRC}$

Pro zjednodušení výpočtů, bylo vřeteno zjednodušeno na nosník zatížený silami a uchycen podporami (ložisky), ve předu je podpora rotační pevná zastupující trojici ložisek, zadní podpora v místě dvou ložisek je také rotační, ale posuvná (kvůli teplotním dilatacím).

Zatěžující síly od obrábění jsou kvůli sjednocení působíště sil pro různé délky nástrojů přesunuta na čelo vřetena, vychýleny od osy vřetena o polovinu průměru nástroje. Reakční síly od kuželového soukolí jsou posunuty mimo osu vřetena o polovinu průměru roztečné kružnice, jak je vidět na obrázku (Obr. 34). V případě vrtání se navíc ze sil F_{Nx} a F_{Ny} stávají silové dvojice a síla F_{Nz} se posouvá do osy nástroje, jelikož se jedná o symetrické zatěžování vřetena.



Obr. 34) Silové zatížení vřetene

Stejně jako u výpočtu zatížení ozubených kol jsou i zde zahrnuty síly od frézování, jež mají vyšší hodnoty než síly od vrtání.

Tab 10) Přehled rozměrů a známého zatížení

a [m]	b [m]	c [m]	r_B [m]	r_N [m]	F_{Nz} [N]	F_{Nx} [N]	F_{Ny} [N]	F_{Bx} [N]	F_{By} [N]	F_{Bz} [N]
0,068	0,25845	0,06355	0,08	0,08115	8379	3724	9310	3972	-886	3048

Podmínky statické rovnováhy

$$F_x: -F_{Nx} + F_{Ax} + F_{Bx} - F_{Cx} = 0 \quad (28)$$

$$F_y: F_{Ny} - F_{Ay} - F_{By} + F_{Cy} = 0 \quad (29)$$

$$F_z: -F_{Nz} + F_{Az} + F_{Bz} = 0 \quad (30)$$

$$M_{Ax}: -F_{Ny} \cdot a + F_{Nz} \cdot r_N + F_{Bz} \cdot r_B - F_{By} \cdot b + F_{Cy} \cdot (b + c) = 0 \quad (31)$$

$$M_{Ay}: -F_{Nx} \cdot a - F_{Bx} \cdot b + F_{Cx} \cdot (b + c) = 0 \quad (32)$$

Jedná se o soustavu pěti rovnic o pěti neznámých. Soustavu lze tedy vyřešit.

Výpočet podpory C

$$F_{Cy} = \frac{F_{Ny} \cdot a - F_{Nz} \cdot r_N - F_{Bz} \cdot r_B + F_{By} \cdot b}{b + c} = -3028 \text{ N} \quad (33)$$

$$F_{Cx} = \frac{F_{Nx} \cdot a - F_{Bx} \cdot b}{b + c} = 6177 \text{ N} \quad (34)$$

Výpočet podpory A

$$F_{Ax} = F_{Nx} - F_{Bx} + F_{Cx} = 10583 \text{ N} \quad (35)$$

$$F_{Ay} = F_{Ny} - F_{By} + F_{Cy} = 1582 \text{ N} \quad (36)$$

$$F_{Az} = F_{Nz} - F_{Bz} = 6262 \text{ N} \quad (37)$$

Pro následné výpočty bude zapotřebí nahradit radiální složky sil ve všech bodech výslednou radiální silou. To provedeme superpozicí těchto sil.

$$F_{Ar} = \sqrt{F_{Ax}^2 + F_{Ay}^2} = 10701 \text{ N} \quad (38)$$

$$F_{Br} = \sqrt{F_{Bx}^2 + F_{By}^2} = 4070 \text{ N} \quad (39)$$

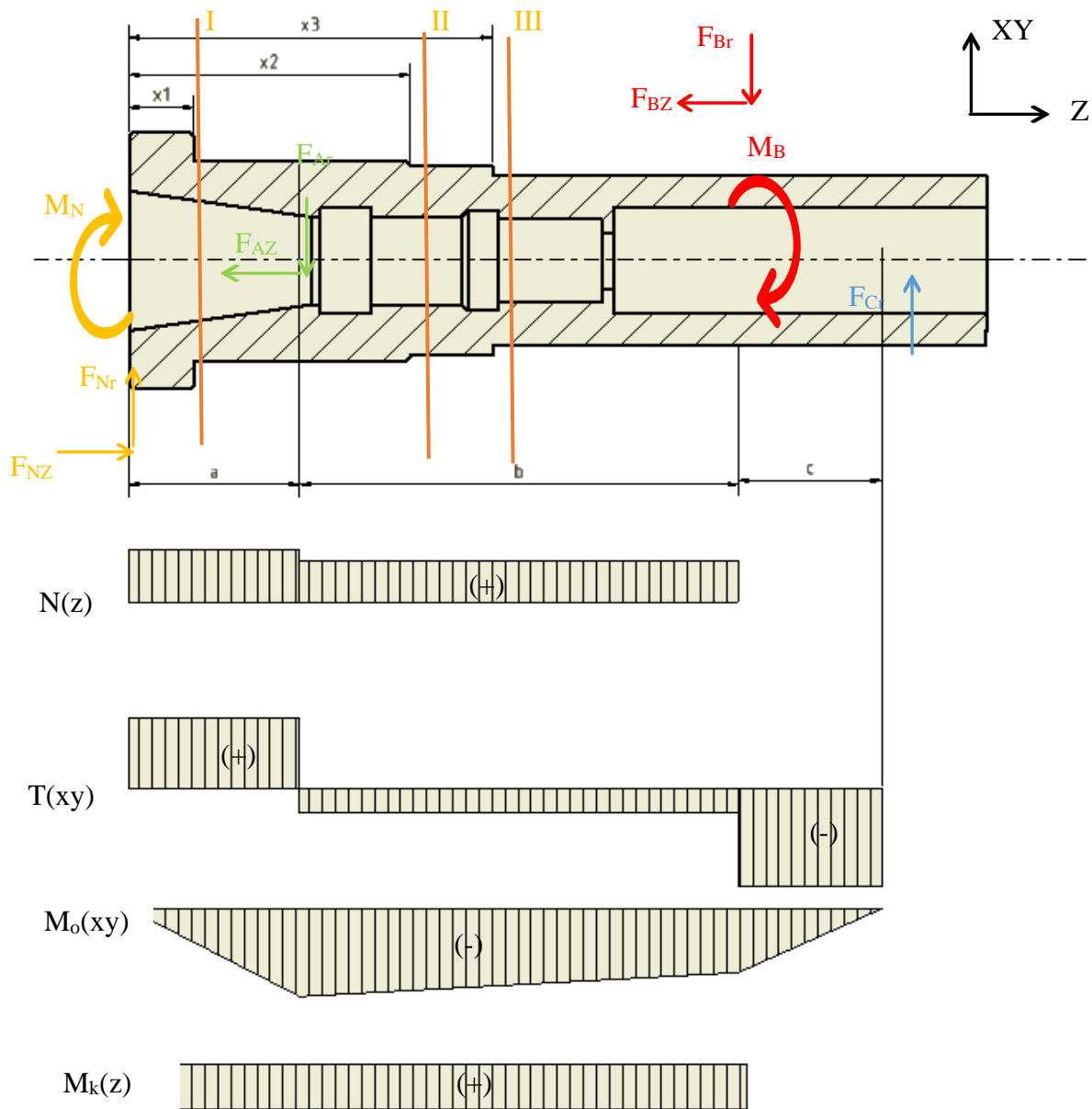
$$F_{Cr} = \sqrt{F_{Cx}^2 + F_{Cy}^2} = 6879 \text{ N} \quad (40)$$

$$F_{Nr} = \sqrt{F_{Nx}^2 + F_{Ny}^2} = 9169 \text{ N} \quad (41)$$

8.2.2 Výsledné vnitřní silové účinky

Pro nadcházející pevnostní výpočet vřetena je nutné znát výsledné vnitřní účinky (VVÚ). Ty se stanoví na základě podmínek statické rovnováhy. Grafické znázornění průběhu VVÚ po délce střednice je vyznačeno na následujícím obrázku (Obr. 35). Jsou zde zaznačeny i kritické průřezy, které budou následně kontrolovány. Byly zvoleny na základě předpokladu nejvyššího napětí. Hodnoty jednotlivých extrémů lze vyčíslit za pomoci podmínek statické rovnováhy, zatímco daný grafický výstup je nutné brát spíše jako orientační.

Z VVÚ lze vyčíslit, že namáhání ve zvolených průřezech je převážně kombinované, musíme tedy vypočítat redukované napětí, a to pak porovnat s mezními stavy. V místech kontrolovaných průřezů se také nacházejí skokové změny průřezů (vruby), se kterými je nutné počítat jakožto koncentrátory napětí. Vliv těchto koncentrátorů na napjatost se vyjadřuje smluvně pomocí součinitele koncentrace napětí [29].



Obr. 35) Výsledné vnitřní účinky (VVÚ) vřetene

Pro určení kritické průřezy budou následovně vypočítána zátěžná napětí. Pokud by se jednalo pouze o jednoosou napjatost, stačilo by v kritických místech spočítat napětí a porovnat jej s mezí kluzu. Jelikož se jedná o kombinovaná napětí, je nutné použít napětí redukované.

Redukované napětí je hodnota fiktivní tahové napjatosti, přiřazené prostorové napjatosti tak, že prostá bezpečnost vzhledem k mezi kluzu je stejná jak pro prostorovou, tak pro fiktivní tahovou napjatost.

Přítomnost vrubů způsobuje skokový průběh napětí v průřezu. Vruby mají za důsledek místní koncentraci napětí. Velikost této koncentrace se zjednodušeně určuje za pomoci součinitele koncentrace napětí α [29].

Ke kontrole průřezů s kombinovaným namáháním se používají dvě metody, jsou to HMH a $\max\tau$, obě metody mají velice podobné výsledky, je tedy na výpočtáři, jakou z metod použije, pokud není striktně dáno, jakou metodou se má počítat. Pro kontrolu těchto tří míst byla zvolena metoda $\max\tau$.

8.2.3 Výpočet bezpečnosti vůči meznímu stavu: průřez I

Tab 11) Parametry pro bezpečnostní kontrolu průřezu I

Vnější průměr pracovního vřetene	D_1 [m]	0,115
Vnitřní průměr pracovního vřetene	d_1 [m]	0,07
Vzdálenost zatěžující síly	x_1 [m]	0,032
Poloměr zaoblení v místě přechodu průměrů	r_1 [m]	0,001
Součinitel koncentrace napětí pro krut [29]	$\alpha_{\tau 1}$	1,9
Součinitel koncentrace napětí pro ohyb [29]	$\alpha_{\sigma 1}$	2,8

Modul průřezu v ohybu

$$W_{o1} = \frac{\pi \cdot (D_1^4 - d_1^4)}{32 \cdot D_1} = 13 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (42)$$

Ohybový moment

$$M_{o1} = F_{Nr} \cdot x_1 - F_{Nz} \cdot r_N = 387 \text{ N} \quad (43)$$

Napětí v ohybu

$$\sigma_{o1} = \frac{M_{o1}}{W_{o1}} = 3 \text{ MPa} \quad (44)$$

Modul průřezu v krutu

$$W_{k1} = \frac{\pi \cdot (D_1^4 - d_1^4)}{16 \cdot D_1} = 26 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (45)$$

Napětí v krutu

$$\tau_{k1} = \frac{M_{k1}}{W_{k1}} = 1,2 \text{ MPa} \quad (46)$$

Napětí v tlaku

$$\sigma_{N1} = \frac{F_{Nz}}{\frac{\pi \cdot (D_1^2 - d_1^2)}{4}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ MPa} \quad (47)$$

Extrémní smykové napětí

$$\tau_{e1} = \tau_{k1} \cdot \alpha_{\tau 1} = 2,23 \text{ MPa} \quad (48)$$

Extrémní normálové napětí

$$\sigma_{e1} = \alpha_{\sigma 1} \cdot (\sigma_{o1} + \sigma_{N1}) = 7,63 \text{ MPa} \quad (49)$$

Redukované napětí – metoda max τ

$$\sigma_{red1} = \sqrt{\sigma_{e1}^2 + 4 \cdot \tau_{e1}^2} = 8,2 \text{ MPa} \quad (50)$$

Bezpečnost vůči mezi kluzu – metoda max τ

$$k_1 = \frac{Re}{\sigma_{red1}} = 26,4 \quad (51)$$

Bezpečnost vůči meznímu stavu v prvním kritickém průřezu vyhovuje více než dostatečně.

8.2.4 Výpočet bezpečnosti vůči meznímu stavu: průřez II

Tab 12) Parametry pro bezpečnostní kontrolu průřezu II

vnější průměr pracovního vřetena	D_2 [m]	0,1
vnitřní průměr pracovního vřetena	d_2 [m]	0,057
Vzdálenost zatěžující síly	x_2 [m]	0,1542
Poloměr zaoblení v místě přechodu průměrů	r_2 [m]	0,001
Součinitel koncentrace napětí pro krut [29]	$\alpha_{\tau 2}$	1,75
Součinitel koncentrace napětí pro ohyb [29]	$\alpha_{\sigma 2}$	2,4

Modul průřezu v ohybu

$$W_{o2} = \frac{\pi \cdot (D_2^4 - d_2^4)}{32 \cdot D_2} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (52)$$

Ohybový moment

$$M_{o2} = F_{Nr} \cdot x_2 - F_{Nz} \cdot r_N - F_{Ar} \cdot (x_2 - a) = 574 \text{ Nm} \quad (53)$$

Napětí v ohybu

$$\sigma_{o2} = \frac{M_{o2}}{W_{o2}} = 6,5 \text{ MPa} \quad (54)$$

Modul průřezu v krutu

$$W_{k2} = \frac{\pi \cdot (D_2^4 - d_2^4)}{16 \cdot D_2} = 18 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (55)$$

Napětí v krutu

$$\tau_{k2} = \frac{M_{k2}}{W_{k2}} = 1,7 \text{ MPa} \quad (56)$$

Napětí v tlaku

$$\sigma_{N2} = \frac{F_{Nz} - F_{Az}}{\frac{\pi \cdot (D_2^2 - d_2^2)}{4}} = 0,3 \text{ MPa} \quad (57)$$

Extrémní smykové napětí

$$\tau_{e2} = \tau_{k2} \cdot \alpha_{\tau 2} = 3 \text{ MPa} \quad (58)$$

Extrémní normálové napětí

$$\sigma_{e2} = \alpha_{\sigma 2} \cdot (\sigma_{o2} + \sigma_{N2}) = 16 \text{ MPa} \quad (59)$$

Redukované napětí – metoda max τ

$$\sigma_{red2} = \sqrt{\sigma_{e2}^2 + 4 \cdot \tau_{e2}^2} = 17 \text{ MPa} \quad (60)$$

Bezpečnost vůči mezi kluzu – metoda max τ

$$k_2 = \frac{R_e}{\sigma_{red2}} = 26 \quad (61)$$

Bezpečnost vůči meznímu stavu v prvním kritickém průřezu vyhovuje více než dostatečně.

8.2.5 Výpočet bezpečnosti vůči meznímu stavu: průřez III

Tab 13) Parametry pro bezpečnostní kontrolu průřezu III

vnější průměr pracovního vřetena	D_3 [m]	0,095
vnitřní průměr pracovního vřetena	d_3 [m]	0,05
Vzdálenost zatěžující síly	x_3 [m]	0,177
Poloměr zaoblení v místě přechodu průměrů	r_3 [m]	0,001
Součinitel koncentrace napětí pro krut [29]	$\alpha_{\tau 3}$	1,9
Součinitel koncentrace napětí pro ohyb [29]	$\alpha_{\sigma 3}$	2,9

Modul průřezu v ohybu

$$W_{o3} = \frac{\pi \cdot (D_3^4 - d_3^4)}{32 \cdot D_3} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (62)$$

Ohybový moment

$$M_{o3} = F_{Nr} \cdot x_3 - F_{Nz} \cdot r_N - F_{Ar} \cdot (x_3 - a - b) = 598 \text{ Nm} \quad (63)$$

Napětí v ohybu

$$\sigma_{o3} = \frac{M_{o3}}{W_{o3}} = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ MPa} \quad (64)$$

Modul průřezu v krutu

$$W_{k3} = \frac{\pi \cdot (D_3^4 - d_3^4)}{16 \cdot D_3} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (65)$$

Napětí v krutu

$$\tau_{k3} = \frac{M_{k3}}{W_{k3}} = 1,9 \text{ MPa} \quad (66)$$

Napětí v tlaku

$$\sigma_{N3} = \frac{F_{Nz} - F_{Az}}{\frac{\pi \cdot (D_3^2 - d_3^2)}{4}} = 0,4 \text{ MPa} \quad (67)$$

Extrémní smykové napětí

$$\tau_{e3} = \tau_{k3} \cdot \alpha_{\tau 3} = 3,7 \text{ MPa} \quad (68)$$

Extrémní normálové napětí

$$\sigma_{e3} = \alpha_{\sigma 3} \cdot (\sigma_{o3} + \sigma_{N3}) = 23,7 \text{ MPa} \quad (69)$$

Redukované napětí – metoda $\max\tau$

$$\sigma_{red3} = \sqrt{\sigma_{e3}^2 + 4 \cdot \tau_{e3}^2} = 23,7 \text{ MPa} \quad (70)$$

Bezpečnost vůči mezi kluzu – metoda $\max\tau$

$$k_3 = \frac{Re}{\sigma_{red3}} = 18,6 \quad (71)$$

Bezpečnost vůči meznímu stavu v prvním kritickém průřezu vyhovuje více než dostatečně [31].

8.3 Volba a návrh ložisek

Požadavkem na každou frézovací hlavu jsou nejen výkonnostní parametry, ale také parametry životnosti. Frézovací hlava zdaleka není jednoúčelovým zařízením, nemá přesně definovanou technologickou operaci, ani za jakých režných podmínek bude pracovat. To je nutné brát v úvahu při návrhu ložisek. Výslednou trvanlivost ovlivňuje technologie obrábění, otáčky při daném druhu obrábění a také procentuální doba zatížení ložisek v daném režimu.

8.4 Trvanlivost ložisek

Trvanlivost ložisek udává počet otáček nebo provozních hodin, které ložisko za daných provozních podmínek vykoná, než se na valivých elementech nebo oběžných drahách objeví stopy v důsledku kontaktní únavy (pittingu). Většinou se uvažuje 90% spolehlivost [15].

Výpočet trvanlivosti pro všechny ložiskové uzly bude proveden pro nejnáročnější operaci, tedy čelní frézování-

Pro výpočet základní trvanlivosti ložisek slouží vztah [15]:

$$L_{h10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (72)$$

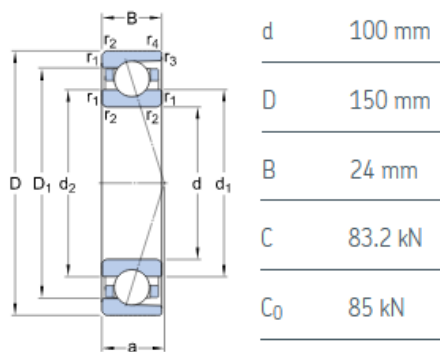
Součinitel p vyjadřuje, jedná-li se o ložisko se stykem bodovým (pak $p=3$) nebo se stykem čárovým (pak $p=10/3$).

Při obrábění vzniká nejen radiální, ale i axiální zatížení, je tedy pro výpočet důležité určit ekvivalentní dynamické zatížení P , které udává podíl radiálního a axiálního zatížení. Koeficienty X a Y udávanými výrobcem ložiska [15].

$$P = X \cdot F_r + Y_2 \cdot F_a \quad (73)$$

Důležitým parametrem je i mezní hodnota e , ta je dána poměrem axiální síly F_a a radiálního zatížení F_r . Výrobce ložiska udává pro dané podmínky hodnotu parametru e , která se porovnává s vypočteným poměrem axiální a radiální síly. To umožní správně zohlednit jejich vliv na P .

8.5 Trvanlivost čelních ložisek vřetene



Obr. 36) Ložisko SKF 7020 CD P4A [15]

Nejnižší trvanlivost byla zjištěna u ložisek středního hřídele, kde nejsou ložiska v tandemu, ale pouze samostatně (Obr 36).

$$C_v = C = 83,2 \text{ kN} \quad (74)$$

$$e_v = \frac{F_{va}}{F_{vr}} = 0,072 \quad (75)$$

Koeficient e pro tento typ ložisek je 0,68 $\Rightarrow e_v < e$ pro výpočet trvanlivosti bude dále uvažováno pouze radiální zatížení. Dle [15] je výpočet dynamického zatížení:

$$P = F_{rA} = 9703 \text{ N} \quad (76)$$

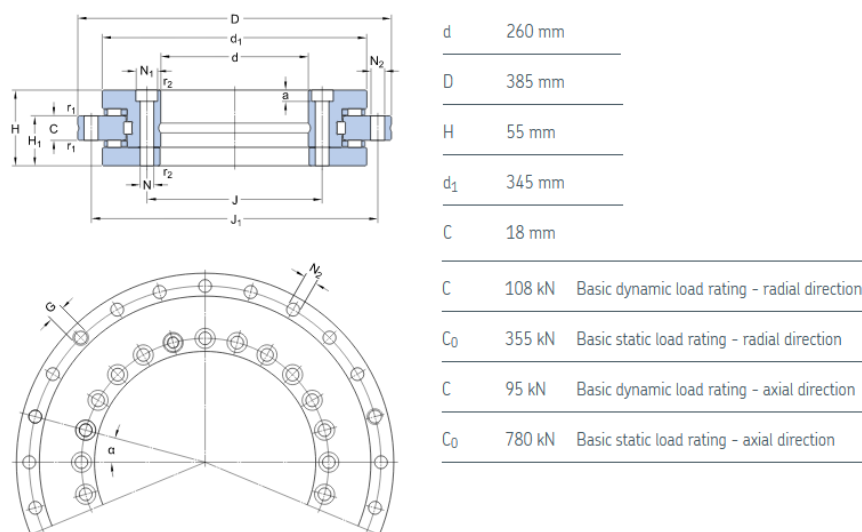
Pro uvažované otáčky pro čelní frézování 98 min^{-1} se trvanlivost vypočítá následovně:

$$L_{h10v} = \left(\frac{C_v}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = 107137 \text{ hod} \quad (77)$$

Tato trvanlivost je více než dostatečná, musíme vzít v potaz, že zahrnuje extrémní podmínky, jimž hlava nebude vystavena po celou dobu a trvanlivost ložisek proto bude vyšší.

8.6 Axiálně radiální ložisko

Ložisko slouží k natačení osy a jak již název napovídá, jde o ložisko, jež je schopné přenášet, jak axiální, tak radiální zatížení (Obr. 37).



Obr. 37) Axiálně radiální ložisko NRT 260 B firmy SKF [15]

Ložisko se nebude otáčet nijak rychle, proto lze považovat zatížení za statické v axiálním směru ložiska působí hlavně hmotnost otáčených komponent, což je 107 kg hodnota tíhového zrychlení g je uvažována $9,81 \text{ m/s}^2$

$$F_{ax} = m \cdot g = 1049,67 \text{ N} \quad (78)$$

Bezpečnost tohoto ložiska se tedy jednoduše určí z níže uvedeného vztahu

$$k_{axa} = \frac{C_{0a}}{F_{axa}} = 743 \quad (79)$$

Pro bezpečnost v radiálním směru byla vybrána největší síla, se kterou toto ložisko přijde do styku. Je to síla na spojovacím hřídeli, jejíž hodnota dosahuje 10,4 kN.

$$k_{axr} = \frac{C_{0r}}{F_{axr}} = 34 \quad (80)$$

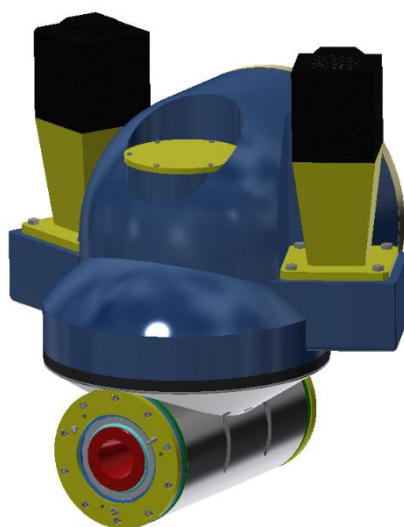
Tyto bezpečnosti jsou více než dostačující.

9 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

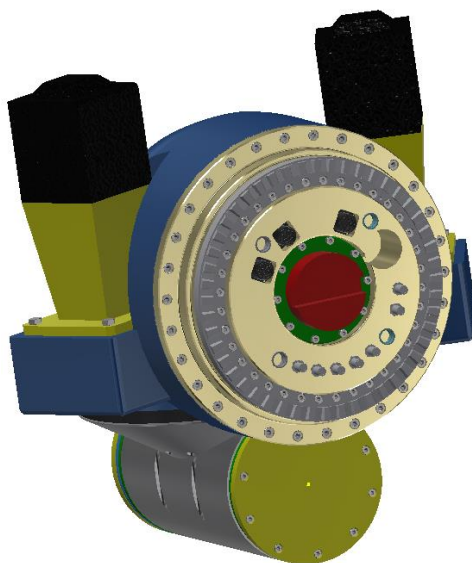
Tato část práce se zabývá samotnou konstrukcí obráběcí hlavy, jsou zde více do detailu popsány její jednotlivé hlavní konstrukční prvky. Na základě výpočtů v předchozí kapitole, byly tyto prvky zkonstruovány, nebo byla zjištěna jejich dostatečná bezpečnost. Na obrázcích v této kapitole je názorně vidět jednotlivé díly hlavně v pohledu řezu (Obr. 40).

Na (Obr. 38) jsou vidět motory s převodovkami, vřetenou do kterého se upíná nástroj, složitý odlitek skříně a otočné části.

Na přípojovací části k vřeteníku (Obr 39) se nachází 7 rychlospojek k přenosu kapalin tři konektory (pro napájení motorů, přenos dat z odměřování a specifikace pro stroj o jakou hlavu se jedná), dále čtyři hydrolock přípojky pro uchycení hlavy k vřeteníku a Hirthův věnec k aretaci hlavy ve správné poloze, vstupní hřídel je osazen drážkou, do níž zapadnou kameny od vřeteně.



Obr. 38) Přední pohled na obráběcí hlavu



Obr. 39) Hlava z pohledu dělicí roviny

Uspořádání ložisek je patrné z pohledu řezu Řez hlavou kolem všech vysoce přesných ložisek výrobce SKF je zajištěn průtok chladicí kapaliny, aby nedošlo k jejich zadření při vysokých otáčkách, axiálně radiální ložisko ani axiální ložisko nepotřebují chlazení, neboť zajišťují otáčení kolem osy B, kde jsou minimální otáčky. Předepnutí ložisek je zajištěno rozpěrnými kroužky/ válci a pojistnými maticemi, aby byla vymezena jejich vůle.

Těsnění bylo zvoleno kontaktní od firmy TRELLERBORG, jelikož tato těsnění mají jazýček s vrstvou teflonu, ke snížení tření, není tedy nutné řešit ofuk labyrintu, v oblasti obráběcího prostoru.

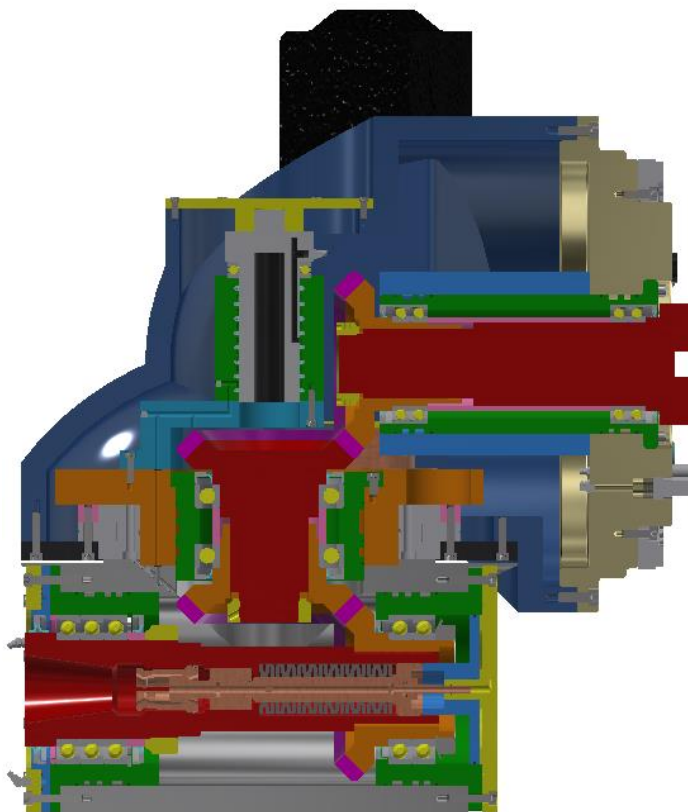
Veškerá média jsou přivedena hadicemi na rychlospojky případně šroubení v případě chladicí kapaliny, do rotačního přívodu kapalin odkud jsou dále distribuována na místo určení.

Mazání ozubeného soukolí je zajištěno plastickým mazivem, jež odkapává na ozubení.

Řezná kapalina je přiváděna do obráběcího prostoru středem nástroje, přes duté upínání firmy Berg Spanntechnik a z předního čela přímo k nástroji.

Uvolnění nástroje je realizováno modře znázorněným pístem, za nějž když je přiveden hydraulický olej, přetlačí sílu pružin a nástroj tak uvolní, lze k tomuto pístu umístit i čidlo jeho polohy, pro kontrolu uvolnění nástroje.

Pohyb osy B je realizován dvěma motory s planetovými převodovkami a s pastorky, roztáčejícími oranžově znázorněné ozubené kolo, k němuž je pevně uchycena otočná část hlavy.



Obr. 40) Řez hlavou

10 ZÁVĚR

Předmětem této diplomové práce bylo provést konstrukční návrh obráběcí hlavy s kontinuálním polohováním B osy pro těžké obráběcí centrum. Návrhu předcházela rešerše v oblasti obráběcích center, konkrétní příklady obráběcích hlav, pozornost byla věnována i různým pohonům os a nástroje

V první části závěrečné práce je vymezen pojem „obráběcí centrum“. Následně je provedena rešerše obráběcích hlav, zmíněna jsou i specifika jejich konstrukce a využití. Důležité je i odměřování, které je využito např. pro osu B (polohování kolmo k ose vřetene) Stručně jsou popsány i technologické operace, které je možno na stroji provádět.

Konstrukční část začíná výpočtem potřebných řezných sil, výkonů a momentů u různých operací, jedná se o čelní frézování, a vrtání do plného materiálu. Hlava je navrhována pro hrubovací operace. Navrženo bylo celkem šest různých variant uspořádání pohonu osy a vřetene, z nichž byla vybrána pomocí metody pořadí optimální koncepce. Pohon je v tomto případě realizován jako nepřímý, osa motoru se nachází mimo osu vřetena a excentricita je vyřešena převodem kuželovým ozubením. Otáčení B osy je realizováno pomocí dvou motorů v režimu MASTER-SLAVE Mezi elektromotor a převod je vřazena planetová převodovka, která zvyšuje krouticí moment. Návrh pohonu (motoru, převodovky i ozubeného převodu) byl proveden na základě statického hlediska. Zvolený elektromotor Stöber EZ701U je v synchronní verzi, má tedy oproti asynchronnímu výhodu v menších rozměrech a nižší hmotnosti při podobných hodnotách jmenovitého výkonu a krouticího momentu, s vestavěnou brzdou nemusí být motor po celou dobu napájen, aby byl aretován v jedné poloze. Za motorem je řazena planetová převodovka P822 stejnojmenného výrobce. Je zvolena verze s převodovým poměrem 70, ten zajistí krouticí moment potřebný pro otáčení. Všechny tři hřídele jsou opatřeny čtyřmi drážkami k přenosu krouticího momentu od ozubených kol. Všechna vřetena jsou pro zvýšení tvrdosti cementována a kalena.

Dále byla zvolena ložiska pro uložení hřídelů. Vřeteno je uloženo v pěti kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem výrobce SKF, s velikostí stykového úhlu 15° . Tímto uspořádáním lze zachytávat velká radiální i axiální zatížení. Ložiska jsou mazána trvalou náplní mazacího tuku. Po určení reakcí v ložiscích bylo možno stanovit jejich trvanlivosti. Pro pevnostní výpočet vřeten bylo třeba určit průběh VVU, čímž bylo možné stanovit nebezpečná místa a v nich určit bezpečnosti vůči meznímu stavu pružnosti.

Ložiska jsou zatěsněna těsněními společnosti TRELLEBORG, jež jsou vybavena teflonovými jazýčky zajišťujícími maximální těsnost a minimální tření. Těsnění tohoto výrobce je použito i v převodníku kapalin, pro těsnění ostatních součástí byly použity o-kroužky, neboť zbylé součásti nerotují ve vysokých otáčkách.

Pro odměřování osy B bylo vybráno přímé inkrementální odměřování natočení Schaeffler YRTCM s vysokým rozlišením úhlu natočení, aby bylo odměřování co nejpřesnější. Toto odměřování je umístěno přímo na axiálně-radiálním ložisku, aby zabíralo co nejméně prostoru.

K upnutí hlavy k vřeteníku slouží čtyři hydromechanické upínače Hydrodock 40 od společnosti Berg Spanntechnik. Tuhé upnutí zajišťuje Hirthův věnec.

Skříň samotná je složitý monolitický odlitek z litiny s lupínkovým grafitem. To komplikuje její výrobu a montáž, avšak má příznivý vliv na tuhost celé soustavy.

Média jsou převáděna pomocí rychlospojek zapadajících do vřeteníku přes hadice a následně distribuována přes rotační přívod kapalin až na místo určení. Jedná se o přívod procesní kapaliny, chlazení ložisek, upínání nástroje a mazání ozubení.

Řešeny nebyly prvky diagnostiky jako jsou např. čidla vibrací, čidla teploty apod.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha : MM publishing, 2014. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [2] TOS KUŘIM, [online] Dostupné z: <http://www.tos-kurim.cz/cz/>
- [3] MANDAULA, [online] Dostupné z: https://www.madaula.com/products_resume_vertical_lathes.html
- [4] FERMAT [online] Dostupné z: <https://www.fermatmachinery.com/produkt/frezovaci-hlavy-licni-desky>
- [5] ZIMMERMANN, [online] Dostupné z: <https://www.f-zimmermann.com/us/milling-heads/m3abc/>
- [6] TOS Varnsdorf, [online] Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/prislusenstvi/frezovaci-hlavy/>
- [7] PAMA, [online] Dostupné z: <https://mrm-machinery.cz/cnc-stroje/pama/pama-frezovaci-hlavy/>
- [8] D'ANDREA, [online] Dostupné z: <https://www.lfc.co.id/products/detail/DAndrea-Boring-Facing-Head-U-tronic>
- [9] FERMAT [online] Dostupné z: <https://www.fermatmachinery.com/pouzite-stroje/karusel/dvoustojanovy/sc-22-cs-181153/>
- [10] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0361-6.
- [11] CYTEC Systems, CyMill [online] 2020. Dostupné z: <https://www.cytec.de/en/downloads.html>
- [12] BERG Spanntechnik [online] 2021. Dostupné z: <https://www.berg-spanntechnik.de/en/>
- [13] PLÁNIČKA, František. Precizní upínače zvyšují přesnost i produktivitu. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/precizni-upinace-zvysuji-presnost-i-produktivitu.html>
- [14] AMASTONE Industries Marketplace [online] Dostupné z: <https://amastone.com/guide/cnc-tool-holders-marble-glass-industry/>
- [15] SKF, *Rolling Bearings Catalogue* [online] 2018. Dostupné z: <https://www.skf.com/binary/77-121486/SKF-rolling-bearings-catalogue.pdf>
- [16] SCHAEFFLER, [online] Dostupné z: <https://medias.schaeffler.de/de>
- [17] STÖBER, Rem technik [online] 2021. Dostupné z: <https://www.rem-technik.cz/files/files/195/442437-en-07-servo-g geared-motors.pdf>
- [18] BILÍK, Oldřich. *Obrábění I. - 1. díl*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2001. ISBN 80-7078-811-9
- [19] LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů*. In. www.zcu.cz [online]. 2012. Dostupné z: https://www.zcu.cz/pracoviste/vyd/online/Zaklady_stavby.pdf

- [20] TRELLEBORG Sealing solution [online]. 2017. Dostupné z: <https://www.trelleborg.com/en/seals>
- [21] KOPAL, Miroslav. Odměřovací systémy a jejich vliv na přesnost. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/odmerovaci-systemy-a-jejich-vliv-na-presnost.html>
- [22] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online] 2004. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [23] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2. část* [online]. 2004. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-2cast.pdf
- [24] LIMTECH, [online] 2021. Dostupné z: <https://www.limetech.cz/vrtacka-radialni-vo-32/3092>
- [25] STAHL, Jan-Eric. *Metal cutting: Theories and Models*. Lund Univeristz: Division of Production and Material Engineering, 2012. ISBN 978-91-637-
- [26] SECO, [online] 2021. Dostupné z: <https://www.secotools.com>
- [27] PRÁŠIL, Ludvík. Kuželová kola se šikmými a zakřivenými zuby. [Online] 2010. Dostupné z: http://www.kst.tul.cz/podklady/casti_fs/podklady/Kuzelova%20soukoli%20se%20sikmymi%20a%20zakrivenymi%20zuby.pdf
- [28] T-PROM, [online] 2021. Dostupné z: <http://www.tprom.cz/>
- [29] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

12 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

12.1 Seznam použitých zkratk

3D	3 dimensional	Prostorový
CNC	computer numerical control	počítačové číslicové řízení
ISO	International organization for standardization	Mezinárodní organizace pro normalizaci
TOS	-	Továrny obráběcích strojů

12.2 Seznam použitých symbolů

Značka	Veličina	Jednotka
a, b, c	délkové rozměry vřetene	[m]
A_{Di}	průřezů třísek	[mm ²]
a_e	šířka záběru	[mm]
a_p	hloubka řezu	[mm]
b	jmenovitá šířka třísky	[mm]
C	dynamická únosnost ložiska	[kN]
C_v	celková dynamická únosnost ložisek	[kN]
D_1	průměr roztečné kružnice	[mm]
$D_{1, 2, 3}$	vnější průměry pracovního vřetene	[m]
$d_{1, 2, 3}$	vnitřní průměr pracovního vřetene	[m]
D_c	Průměr frézy	[mm]
D_h	průměr, který obíhá konec nástroje	[m]
e_v	koeficient pro určení zatížení ložiska	[-]
f	posuv nástroje	[mm/ot]
F_a	axiální síla působící na ložisko	[N]
F_a	axiální síla	[N]
F_a	axiální složka řezné síly	[N]
F_{Ar}, F_{Br}, F_{Cr}	výsledná radiální síla	[N]
F_{Ax}, F_{Bx}, F_{Cx}	složka radiální síly působící na vřeteno	[N]
F_{Ay}, F_{By}, F_{Cy}	složka radiální síly působící na vřeteno	[N]
F_{Az}, F_{Bz}, F_{Cz}	axiální síla působící na vřeteno	[N]
F_c	řezná síla	[N]
F_f	posuvová síla	[N]
F_p	radiální složka řezné síly	[N]
F_r	radiální síla působící na ložisko	[N]

F_t	tečná síla	[N]
f_z	posuv na zub	[mm]
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
h_i	dílčí tloušťka třísky	[mm]
i	počet ložisek	[-]
i_m	převodový poměr planetové převodovky motoru	[-]
i_p	převodový poměr	[-]
$k_{1, 2, 3}$	bezpečnost vůči mezi kluzu	[-]
k_c	měrný řezný odpor	[MPa]
L_{h10}	trvanlivost ložisek	[hod]
m	hmotnost otáčených komponent	[kg]
M_{2acc}	max. akcelerační kroutící moment motoru	[Nm]
M_{2N}	jmenovitý kroutící moment motoru	[Nm]
M_{2NOT}	max. brzdící kroutící moment motoru	[Nm]
mc	exponent vlivu tloušťky třísky na měrný řezný odpor	[-]
M_k	kroutící moment	[Nm]
M_{km}	kroutící momentu potřebný k pootočení osy	[Nm]
m_m	hmotnost motoru	[kg]
$M_{o1, 2, 3}$	ohybový moment	[Nm]
n	otáčky	[min ⁻¹]
n_m	výstupní otáčky motoru	[min ⁻¹]
P	dynamické zatížení ložiska	[N]
p	koeficient styku ložiska	[-]
P_c	řezný výkon	[kW]
$r_{1, 2, 3}$	poloměr zaoblení v místě přechodu průměrů	[m]
r_B, r_N	poloměry na vřetení	[m]
v_c	řezná rychlost	[m/min]
$W_{k1, 2, 3}$	modul průřezu v krutu	[m ³]
$W_{o1, 2, 3}$	modul průřezu v ohybu	[m ³]
X, Y_2	koeficienty udávající podíl axiální a radiální síly působící na ložisko	[-]
$x_{1, 2, 3}$	vzdálenost zatěžující síly	[m]
z	počet zubů	[-]
z_e	počet zubů v záběru	[-]
α_t	úhel záběru	[°]
$\alpha_{\sigma 1, 2, 3}$	součinitel koncentrace napětí pro ohyb	[-]
$\alpha_{\tau 1, 2, 3}$	součinitel koncentrace napětí pro krut	[-]
β_{mn}	úhel sklonu zubu	[°]
γ_0	úhel čela	[°]

δ_1	úhel roztečného kužele kolo 1	[°]
δ_2	úhel roztečného kužele kolo 2	[°]
η_p	účinnost převodu	[-]
η_v	účinnost válečkového ložiska	[-]
κ_r	úhel hlavního ostří	[°]
$\sigma_{e1, 2, 3}$	extrémní normálové napětí	[MPa]
$\sigma_{N1, 2, 3}$	napětí v tlaku	[MPa]
$\sigma_{o1, 2, 3}$	napětí v ohybu	[MPa]
$\sigma_{red1, 2, 3}$	redukované napětí	[MPa]
$\tau_{e1, 2, 3}$	extrémní smykové napětí	[MPa]
$\tau_{k1, 2, 3}$	napětí v krutu	[MPa]
ψ_{max}	úhel opásání	[°]

12.3 Seznam tabulek

TAB 1) ULOŽENÍ VŘETEN VYTVOŘENÉ Z RADIÁLNÍCH KULIČKOVÝCH LOŽISEK S KOSOUHLÝM STYKEM (OŘÍZNUTO) [1]	18
TAB 2) VÍCEKRITERIÁLNÍ HODNOCENÍ NÁVRHU ORTOGONÁLNÍ HLAVY ..	30
TAB 3) PARAMETRY FRÉZY SECO SD602-139/140-90RG [26]	32
TAB 4) VYPOČTENÉ DÍLČÍ HODNOTY ŘEZNÝCH SIL [22]	33
TAB 5) PARAMETRY KARBIDOVÉHO VRTÁKU SECO SD265A-16.009-62-16R1 [26]	34
TAB 6) PARAMETRY KUŽELOVÉHO SOUKOLÍ [27]	36
TAB 7) PARAMETRY PRO NÁVRH MOTORŮ	38
TAB 8) PARAMETRY MOTORU EZ701U S PŘEVODOVKOU P822 [17]	38
TAB 9) PARAMETRY OCELI 14 220 [28]	39
TAB 10) PŘEHLED ROZMĚRŮ A ZNÁMÉHO ZATÍŽENÍ	40
TAB 11) PARAMETRY PRO BEZPEČNOSTNÍ KONTROLU PRŮŘEZU I	43
TAB 12) PARAMETRY PRO BEZPEČNOSTNÍ KONTROLU PRŮŘEZU II	44
TAB 13) PARAMETRY PRO BEZPEČNOSTNÍ KONTROLU PRŮŘEZU III	45

12.4 Seznam obrázků

OBR. 1) A) HORIZONTÁLNÍ OBRÁBĚCÍ CENTRUM TOS FU B) PORTÁLOVÉ OBRÁBĚCÍ CENTRUM TOS FRU [2]	10
OBR. 2) PŘÍMÁ FRÉZOVACÍ HLAVA MADAULA G.190 [3]	12
OBR. 3) KOLMÁ FRÉZOVACÍ HLAVA FERMAT PHM 37 [4]	13
OBR. 4) VIDLICOVÁ HLAVA ZIMMERMANN M3ABC [5]	13
OBR. 5) ORTOGONÁLNÍ HLAVA TOS VARNSDORF HOIL 50 [6]	14

OBR. 6)UNIVERZÁLNÍ HLAVA PAMA [7]	14
OBR. 7)LÍCNÍ DESKA D'ANDREA U-TRONIC [8].....	15
OBR. 8)A) NOŽOVÁ HLAVA PAMA [7] B) NOŽOVÁ HLAVA S VÍCE NOŽI FERMAT [9].....	15
OBR. 9)KOLMÁ FRÉZOVACÍ HLAVA HPR 50 [6]	16
OBR. 10)A) ISO DRŽÁK NÁSTROJE B) HSK DRŽÁK NÁSTROJE [14].....	17
OBR. 11)SDRUŽOVÁNÍ LOŽISEK DO DVOJIC [1]	18
OBR. 12)PŘEPÍNÁNÍ KULIČKOVÝCH LOŽISEK S KOSOÚHLÝM STYKEM: A) A C) PEVNÉ PŘEDPĚTÍ, B) PŘEDPĚTÍ PRUŽINOU [15].....	19
OBR. 13)AXIÁLNĚ-RADIÁLNÍ LOŽISKO FIRMY SCHAEFFLER [16].....	19
OBR. 14)A) POHON OSY KONCEPCÍ MASTER SLAVE B) POHON OSY MOMENTOVÝM MOTOREM [17].....	20
OBR. 15)A) NÁHON KUŽELOVÝMI OZUBENÝMI KOLY B)VÝMĚNA ELEKTROVŘETENA VIDLICOVÉ HLAVY FIRMY CYTEC [17].....	20
OBR. 16)A) TĚSNĚNÍ PRO ROTAČNÍ PŘÍVODY B) TĚSNĚNÍ OBRÁBĚCÍHO PROSTORU C) TĚSNĚNÍ LOŽISEK [21]	22
OBR. 17)ODMĚŘOVÁNÍ NA AXIÁLNĚ-RADIÁLNÍM LOŽISKU FIRMY SCHAEFFLER [16]	23
OBR. 18)ČELNÍ FRÉZOVÁNÍ [23].....	24
OBR. 19)VÁLCOVÉ FRÉZOVÁNÍ [23]	24
OBR. 20)RADIÁLNÍ VRTAČKA KOVOSVIT MAS VO 32 [25]	25
OBR. 21)KOMBINACE MOMENTOVÉHO MOTORU A ELEKTROVŘETENA.....	26
OBR. 22)KOMBINACE ŠNEKOVÉHO PŘEVODU A ELEKTROVŘETENA	27
OBR. 23)KOMBINACE MOTORŮ MASTER SLAVE A ELEKTROVŘETENA	27
OBR. 24)KOMBINACE MOMENTOVÉHO MOTORU A KUŽELOVÉHO SOUKOLÍ	28
OBR. 25)KOMBINACE ŠNEKOVÉHO PŘEVODU A KUŽELOVÉHO SOUKOLÍ..	28
OBR. 26)KOMBINACE MOTORŮ MASTER SLAVE A KUŽELOVÉHO SOUKOLÍ	29
OBR. 27)ZÁVISLOST MĚRNÉ ŘEZNÉ SÍLY NA TLOUŠŤCE TRÍSKY [26].....	31
OBR. 28)FRÉZA SECO R220.21-06.00-ON09-10 [27].....	32
OBR. 29)ROZTEČ ZUBŮ V ZÁBĚRU PŘI FRÉZOVÁNÍ	33
OBR. 30)KARBIDOVÝ VRTÁK SECO SD265A-16.009-62-16R1 [27]	34
OBR. 31)ROZLOŽENÍ SIL NA KOLE SE ZAKŘIVENÝMI ZUBY [29]	36
OBR. 32)USPOŘÁDÁNÍ MOTORŮ.....	38
OBR. 33)SYNCHRONNÍ MOTOR S PŘEVODOVKOU FIRMY STÖBER	38
OBR. 34)SILOVÉ ZATÍŽENÍ VŘETENE	40
OBR. 35)VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY (VVÚ) VŘETENE.....	42
OBR. 36)LOŽISKO SKF 7020 CD P4A [15].....	47

OBR. 37)AXIÁLNĚ RADIÁLNÍ LOŽISKO NRT 260 B FIRMY SKF [15]	48
OBR. 38)PŘEDNÍ POHLED NA OBRÁBĚCÍ HLAVU	49
OBR. 39)HLAVA Z POHLEDU DĚLÍČÍ ROVINY	49
OBR. 40)ŘEZ HLAVOU	50

13 SEZNAM PŘÍLOH

- Konstrukční výpočty (v programu Excel)
- CAD model
- Výkresová dokumentace