



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 SPINDLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK ŠVARC

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BLECHA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Marek Švarc

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

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 a tyto parametry zdůvodní. Provede konstrukční výpočty a vlastní konstrukci vřetene v 3D modelu.

Součástí bakalářské práce bude výkres sestavy vřetene, tři výrobní výkresy a v elektronické příloze 3D model stroje.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti frézovacích vřeten obráběcích strojů.

Volba technických parametrů konstruovaného vřetene.

Kontrolní konstrukční výpočty.

Konstrukční návrh vřetene.

Výkres sestavy vřetene

Tři výrobní výkresy

V elektronické příloze 3D model vřetene

Seznam odborné literatury:

Marek, J. a kol; Konstrukce CNC obráběcích strojů, ISBN 978-80-254-7980-3

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

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

Breník, P. a Píč, J.: Obráběcí stroje - konstrukce a výpočty. Edice: Technický průvodce; svazek 59; SNTL Praha 1982

www stránky výrobců obráběcích strojů

www.infozdroje.cz

www.mmspektrum.com

www.kovosvit.cz

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


Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá řešením konstrukce vřetene frézovacího stroje. Nejprve je zpracována rešerše v oblasti frézovacích strojů a jejich vřeten. Zde je uvedeno rozdělení strojů, jejich základní popis a příklady od současných výrobců. V této části jsou také popsány typy vřeten a jejich základní části. Druhá část práce je zaměřena na technické výpočty a konstrukční řešení vřetene na základě stanovených parametrů. Příloha obsahuje výkres sestavy, tři výrobní výkresy a 3D model vřetene.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with solving design of milling machine spindle. At first, the background research in milling machines and their spindles is processed. Here is adduced distribution of machines, basic description and examples from current manufacturers. In this part, there are described types of spindles and their basic parts. Second part of thesis is focused on technical calculations and design of the spindle based on defined parameters. An attachment includes assembly drawing, three main parts drawings and 3D model of spindle.

KLÍČOVÁ SLOVA


Vřeteno, konstrukce vřetene, frézovací stroj, obráběcí stroj, upínání nástrojů, frézka, ložiska obráběcích strojů.

KEYWORDS

Spindle, spindle design, milling machine, machine tool, tools clamping, cutter, machine tools bearings.

BIBIOGRAFICKÁ CITACE

ŠVARC, M. *Konstrukce vřetene frézovacího stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D..

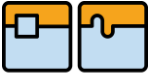

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Konstrukce vřetene frézovacího stroje* vypracoval samostatně pod vedením a s pomocí vedoucího bakalářské práce doc. Ing. Petra Blechy, Ph.D. a všechny použité literární a odborné zdroje uvedl v seznamu literatury.


V Brně dne

.....
vlastnoruční podpis autora

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

Poděkování

Zde bych rád poděkoval doc. Ing. Petru Blechovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při psaní této bakalářské práce a rodině za podporu během studia.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 8
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	



Obsah

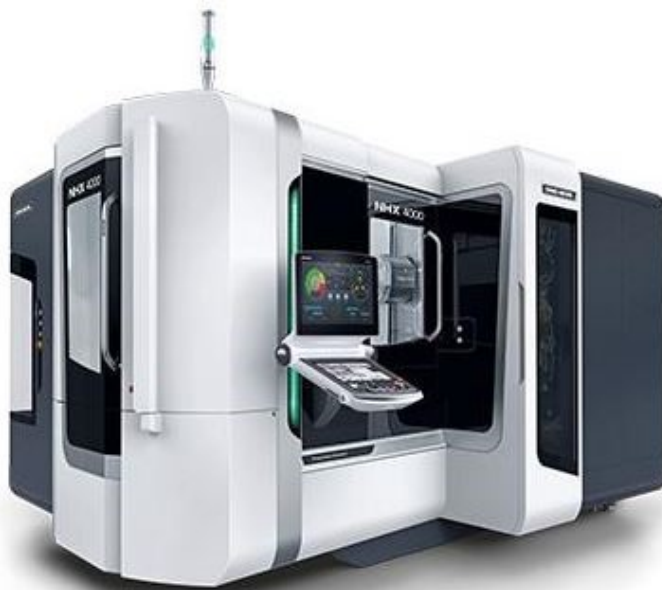
1 Úvod	11
2 Frézování	12
2.1 Popis technologie	12
2.2 Frézovací nástroje	14
3 Frézovací stroje	16
3.1 Rozdělení frézovacích strojů	17
3.2 Konzolové frézky	18
3.2.1 Vodorovné konzolové frézky	18
3.2.2 Svislé konzolové frézky	19
3.3 Stolové frézky	21
3.4 Rovinné frézky	22
3.4.1 Vodorovné rovinné frézky	22
3.4.2 Rovinné frézky s výložníkem	23
3.4.3 Portálové rovinné frézky	24
3.5 Speciální frézky	25
3.5.1 Nástrojařské frézky	25
3.5.2 Kopírovací frézky	26
3.5.3 Karuselové frézky	26
3.5.4 Stroje na výrobu ozubení	26
3.6 CNC stroje	27
3.6.1 Stroje s vodorovnou osou vřetene	28
3.6.2 Stroje se svislou osou vřetene	29
4 Vřetena frézovacích strojů	30
4.1 Popis a funkce vřetene	30
4.2 Obecné požadavky na vřetena	32
4.2.1 Přesnost chodu vřetene	32
4.2.2 Tuhost a deformace vřetene	33
4.3 Uložení vřetene	36
4.3.1 Valivá uložení	36
4.3.2 Kluzná uložení	40
4.3.3 Elektromagnetická uložení	41
4.4 Náhon vřetene	41
4.4.1 Náhon řemenovým převodem	41
4.4.2 Náhon ozubeným převodem	42

4.4.3 Přímý náhon	42
4.4.4 Elektrovřetena	43
4.5 Upínání nástrojů	43
4.6 Příslušenství vřeten	46
5 Návrh konstrukce vřetene	47
5.1 Výběr technologie frézování	47
5.2 Volba vstupních parametrů	48
5.3 Určení otáček vřetene	49
5.4 Výpočet krouticího momentu a řezných sil	49
5.4.1 Maximální krouticí moment	49
5.4.2 Krouticí moment při maximálních otáčkách	50
5.4.3 Krouticí moment a řezná síla při ponorném frézování	50
5.5 Výpočet potřebného výkonu motoru	51
5.6 Výběr elektromotoru	51
5.7 Volba upínacího zařízení	53
5.8 Návrh vřetenových ložisek	54
5.8.1 Výpočet ideální vzdálenosti ložisek	55
5.8.2 Výpočet silových reakcí v ložiscích	56
5.8.3 Axiální síly působící na ložiska	58
5.8.4 Kontrola trvanlivosti ložiska B (přední ložisko)	59
5.8.5 Kontrola trvanlivosti ložiska A (zadní ložisko)	62
5.8.6 Komentář k návrhu ložisek	64
5.9 Kontrola vřetenové hřídele	64
5.9.1 Výpočet průhybu a tuhosti	64
5.9.2 Kontrola hřídele vůči meznímu stavu pružnosti	65
5.9.3 Kontrola hřídele vůči meznímu stavu únavy	67
5.10 Konstrukční provedení vřetene	69
6 Závěr	73
7 Seznam použitých symbolů	74
8 Seznam obrázků	78
9 Seznam tabulek	80
10 Seznam použitých zdrojů	81
11 Seznam příloh	84



1 Úvod

Frézování je jedním z nejvyužívanějších způsobů třískového obrábění. Umožňuje úpravu tvarů především nerotačních součástí, což z něj dělá v kombinaci s CNC technologií velice univerzální způsob obrábění. Frézovací stroje (frézky, CNC frézovací centra) jsou tedy hojně využívány ve strojírenské výrobě, což při dnešním trendu zlepšování efektivity práce vede k neustálému zvyšování požadavků na strojní vybavení.



Obrázek 1.1: Moderní frézovací centrum DMG Mori Seiki [19]

Jednou ze základních součástí frézovacích strojů přímo ovlivňujících přesnost výroby je vřetenem. Vřetenem rozumíme většinou tubusovou část stroje uloženou v ložiskách, u frézek slouží k upnutí nástrojů a přenáší rotační pohyb od elektromotoru na nástroj. Vřetenem musí mít dostatečně tuhé uložení, což lze zajistit především vhodnou volbou ložisek, kdy jsou u drtivé většiny frézovacích vřeten použita ložiska valivá. Samozřejmostí je vysoká rozměrová a geometrická přesnost součástí vřeten. Je nutné omezit vibrace stroje způsobené např. velkou házivosťou ložisek. Nežádoucí je velké tření, tudíž je důležitá správná volba mazacího systému.

Všechny uvedené i další parametry vřetenem spolu s účelem stroje musí být brány v potaz již při návrhu.



Obrázek 1.2: Vřetenem pro vysokorychlostní obrábění [19]



2 Frézování

2.1 Popis technologie

Frézování je metoda třískového obrábění, při které dochází k úběru materiálu obrobku víceřitým nástrojem. Hlavní řezný pohyb – rotaci zde vykonává nástroj (fréza), vedlejší řezný pohyb (posuv) koná obrobek, převážně v kolmém směru na osu nástroje. Moderní frézovací stroje nabízí možnost plynule měnitelné rychlosti posuvů a je možno je realizovat ve více osách zároveň (např. pětiosá obráběcí centra).



Obrázek 2.1: Ukázka frézování – rohová fréza Seco Turbo 10 [20].

Dle části nástroje, jíž obrábíme lze rozlišovat:

- Frézování válcové – úběr materiálu obvodem nástroje (válcové, tvarové frézy).
- Frézování čelní – úběr čelem nástroje (čelní frézy).

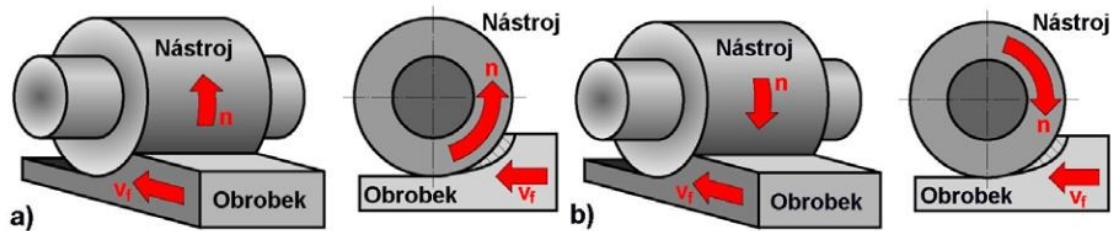
Existují i další způsoby frézování, které vycházejí z těchto dvou základních.

Při **válcovém frézování** užíváme převážně válcové či tvarové frézy. Obrábění probíhá pouze obvodovou plochou frézy, na jejím čele zuby nejsou vytvořeny. V závislosti na vzájemném pohybu obrobku a nástroje rozlišujeme:

- Frézování sousledné – směr posuvu obrobku je shodný se směrem rotace nástroje. Tloušťka třísky odebíraná jedním zubem není v čase konstantní, nýbrž proměnná. Při vniku zubu nástroje do materiálu je tloušťka třísky maximální, postupně se snižuje na nulovou velikost, kdy zub vychází ze záběru. Síly od řezného procesu obvykle působí dolů, do stolu stroje, což vyžaduje řádné vymezení vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. Pokud tak nenastane, hrozí vlivem nestejnomyšerného posuvu k poškození nástroje, popř. i stroje. [1]



- Frézování nesousledné – směr posuvu obrobku je opačný vůči směru rotace nástroje. Tloušťka třísky v tomto případě též není konstantní, narůstá od nulové hodnoty v okamžiku vniku nástroje do materiálu až do maxima, kdy zub frézy vychází ze záběru. Dochází zde k odtahování obrobku od stolu stroje vliv složky řezné síly.

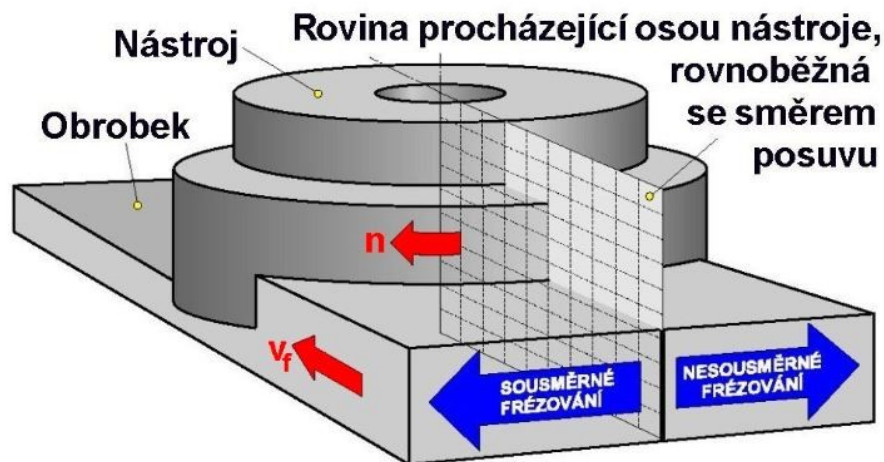


Obrázek 2.2: Schéma válcového frézování:

a) frézování nesousledné

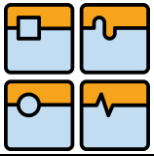
b) frézování sousledné [1].

O **frézováním čelním** mluvíme v případě použití čelních fréz, které mají zuby vyrobeny na čele nástroje (v určitých případech i na obvodu¹). Osa nástroje je tedy při práci kolmá k obráběné ploše. Tloušťka třísky odebíraná jedním zubem je u tohoto typu frézování přibližně konstantní a fréza zde pracuje současně sousledně (neboli sousměrně) a nesousledně (neboli nesousměrně). [1]



Obrázek 2.3: Schéma čelního frézování [1].

¹ Čelní válcová fréza – zuby vyrobeny na obvodu i na čele tělesa nástroje



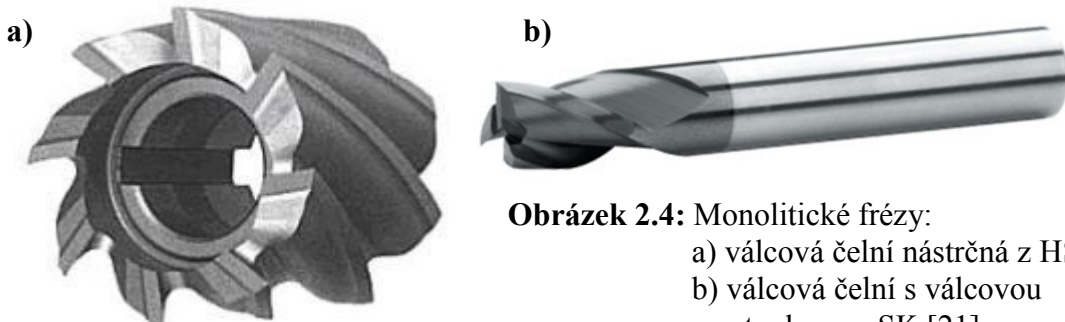
2.2 Frézovací nástroje

Základním nástrojem pro frézování je fréza. Vzhledem k velké rozšířenosti technologie frézování ve výrobě je na současném trhu rozličný sortiment nejrůznějších fréz.

Lze je dělit dle různých hledisek:

- dle umístění zubů na tělese:
 - válcové frézy
 - čelní frézy
 - čelní válcové frézy
- dle použitého materiálu rozlišujeme frézy:
 - z rychlořezné oceli (HSS²)
 - ze slinutých karbidů (SK)
 - z cermetů
 - z KNB
 - z PKD
- dle konstrukce:
 - monolitické – těleso i zuby vyrobeny z jednoho materiálu
 - s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) – upevněny většinou šroubem a upínkou k tělesu z konstrukční oceli
- dle tvaru pracovní části:
 - válcové
 - kotoučové
 - úhlové
 - drážkovací
 - kopírovací
 - rádiusové
 - na výrobu ozubení
- dle způsobu upnutí:
 - nástrčné
 - stopkové – upnutí za válcovou či kuželovou stopku

a dalších, viz [1].



Obrázek 2.4: Monolitické frézy:

- a) válcová čelní nástrčná z HSS [1]
- b) válcová čelní s válcovou stopkou ze SK [21]

² HSS - high speed steel (rychlořezná nástrojová ocel)



Monolitické frézy z HSS jsou vhodné pro obrábění uhlíkových ocelí, legovaných ocelí o nižší pevnosti a neželezných kovů, např. slitin Al či mosazi. Tyto frézy mají menší tvrdost proti frézám ze slinutých karbidů, jsou tedy houževnatější. U měkčích materiálů je možno volit vyšší řezné rychlosti (např. hrubování tvářené slitiny Al, $v_c = 200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, [2]). Výhodou zde může být nižší cena oproti monolitickým frézám z SK.

Monolitické frézy ze slinutých karbidů se většinou vyrábí jako stopkové. Jsou vhodné pro obrábění velmi tvrdých materiálů, přičemž při obrábění běžných uhlíkových ocelí lze užít vyšší řezné rychlosti (např. hrubování uhlíkové oceli o $R_m = 580 \text{ MPa}$, $v_c = 200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, [2]). Pro větší průměry a z úsporných důvodů se používá kombinace tělesa frézy z konstrukční oceli a mechanicky upnutých vyměnitelných břitových destiček.



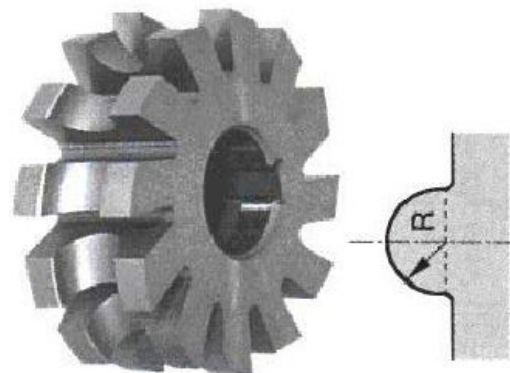
Obrázek 2.5: Válcová rovinná fréza s VBD [22].



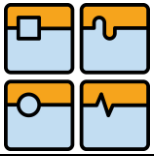
Obrázek 2.6: Kotoučová fréza s VBD [22].



Obrázek 2.7: Odvalovací fréza na výrobu evolventního ozubení [23].

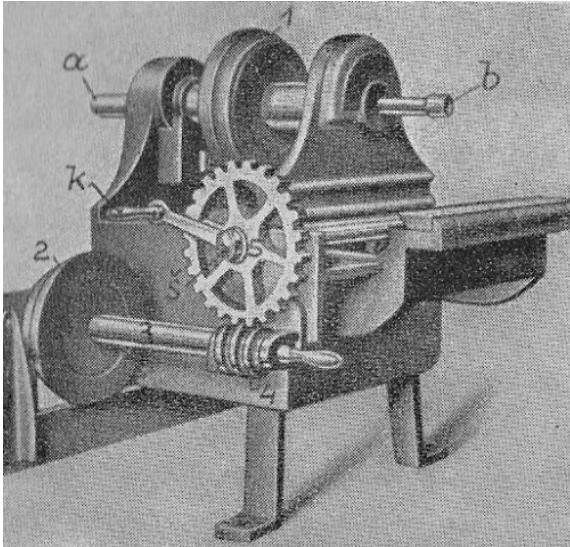


Obrázek 2.8: Válcová fréza rádiusová [1].



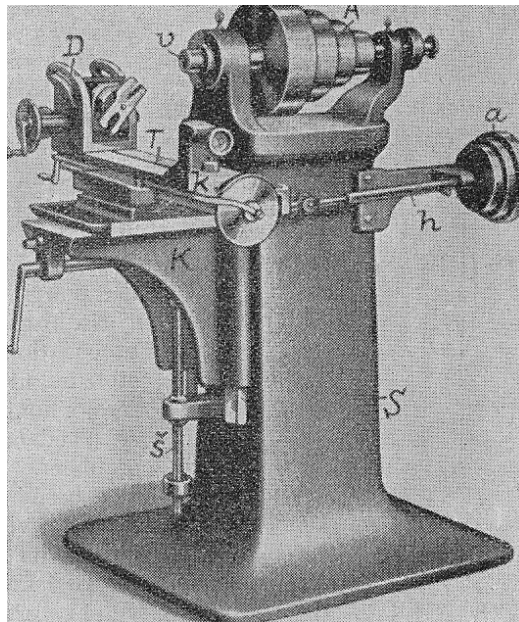
3 Frézovací stroje

Stroje užívané k frézování se souhrnně nazývají frézky. Spadají do skupiny obráběcích strojů, kdy obráběcím strojem rozumíme výrobní stroj, který umožňuje dát obrobku žádaný geometrický tvar a jakost povrchu oddělováním materiálu ve formě třísek řezným nástrojem [3].



Obrázek 3.1: První frézovací stroj z roku 1818 [2].

Dalším strojem byla univerzální frézka vyrobená r. 1862. Na vysokém kovovém stojanu spočívala konzola, jejíž spouštění a zvedání bylo zajištěno pomocí šroubu. Vřeteno bylo vybaveno čtyřstupňovým řemenovým kotoučem, přesouváním řemene se tedy měnily otáčky frézy. Tato frézka již byla vybavena dělicím přístrojem v podobě obdobné se současnými a otočným stolem. Byla určena k výrobě šroubovitých vrtáků, což výrazně zvýšilo jejich přesnost a urychlilo výrobu. V této době byl odstartován rychlý vývoj konzolových frézek.



Obrázek 3.2: Univerzální frézka na výrobu vrtáků z roku 1862 [2].

Tyto stroje byly počátkem ve vývoji konvenčních frézek jak je známe dnes. I přes velký rozmach NC³ a CNC⁴ technologií najdou konvenční stroje využití v menších provozech a nástrojárnách.

³ NC – numerical control (číslicové řízení)

⁴ CNC – computerized numerical control (počítačové číslicové řízení)



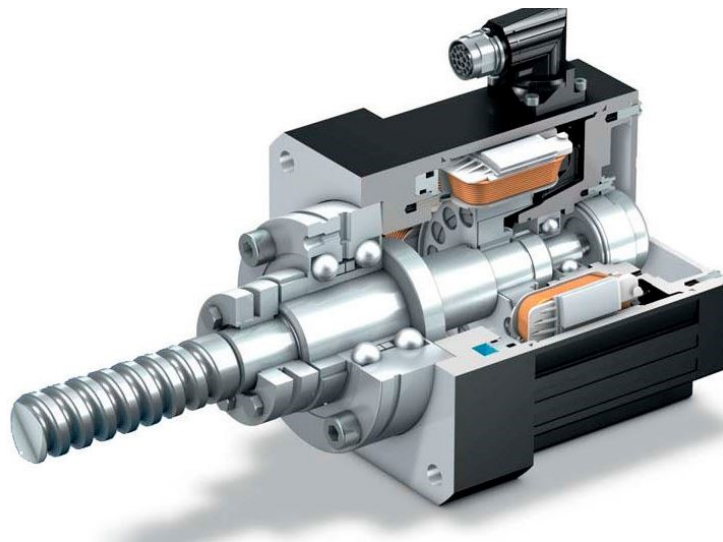
3.1 Rozdělení frézovacích strojů

V současnosti je na trhu množství frézek různých konstrukcí pro dané účely. Základním kritériem rozdělení je způsob řízení stroje. Rozeznáváme tedy:

- konvenční stroje
- CNC stroje.

Pohyby posuvových os jsou **konvenčního stroje** řízeny ručně přes mechanický převod, či automatizovaně strojním posuvem přes převody pomocí elektromotorů. Příkladem může být horizontální konzolová frézka.

U **CNC strojů** jsou posuvy os řízeny počítačovým programem a vykonávány pomocí lineárních servomotorů, či lineárních elektromotorů.

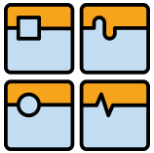


Obrázek 3.3: Servomotor pro pohon posuvové osy [24].

V dalším textu se budeme zajímat o rozdělení strojů dle konstrukce. Jak vidíme dle [4], frézky lze dělit do 3 hlavních konstrukčních skupin.



Obrázek 3.4: Rozdělení frézovacích strojů dle konstrukčního uspořádání [24].

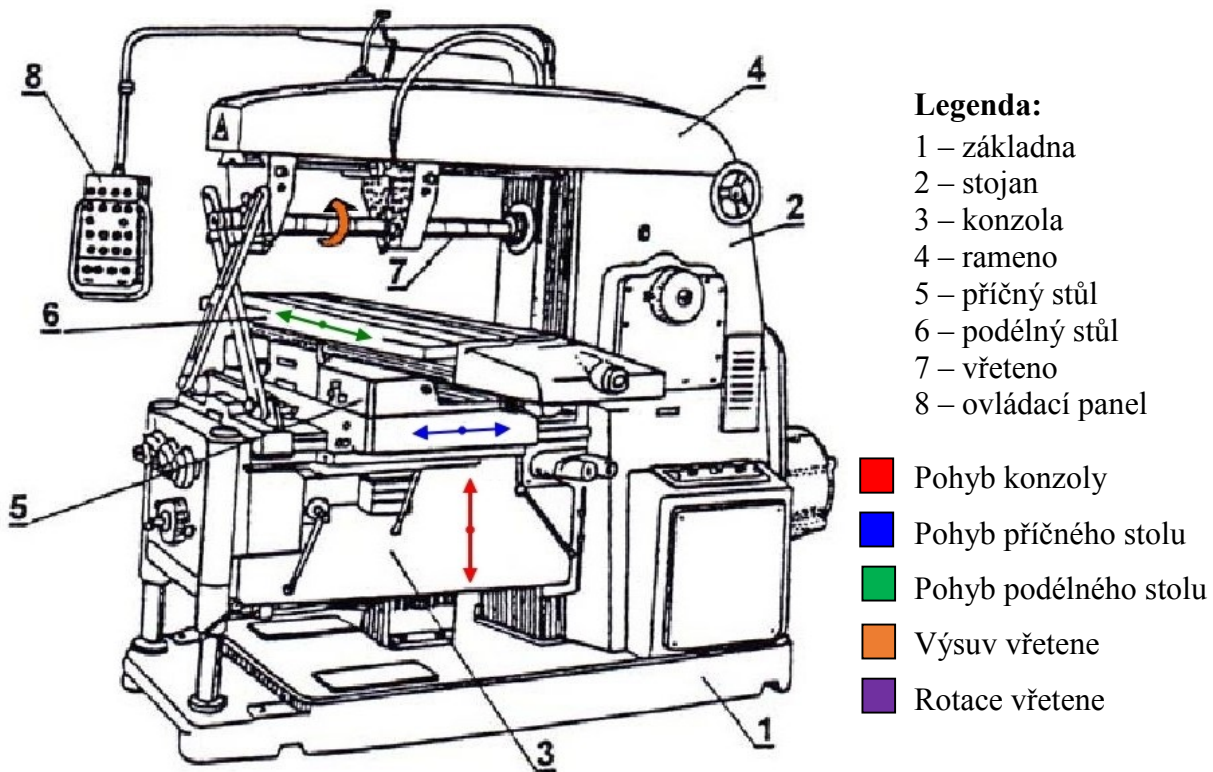


3.2 Konzolové frézky

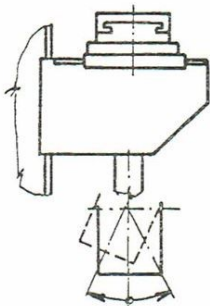
Tyto frézky jsou vybaveny tzv. konzolou, která je uložena ve vedení na stojanu stroje a je na něm svisle přestavitelná. Konzola bývá opatřena příčnými saněmi, ve kterých se pohybuje podélný pracovní stůl. Upnutí obrobku se provádí pomocí upínek přímo do pracovního stolu, či do dělicího přístroje, otočného stolu a dalšího příslušenství. Tyto frézky jsou obecně méně tuhé než např. stolové, což je způsobeno pohyblivým uložením konzoly.

3.2.1 Vodorovné konzolové frézky

Mají osu rotace vřetene ve vodorovném směru. Užívají se např. pro frézování drážek kotoučovými frézami, či obrábění rovinných ploch frézami válcovými. Použití stopkových fréz je málo časté, ačkoliv možné, upínají se do normalizovaného kužele konce vřetene. Ve většině případů se tedy pracuje s frézami nástrčnými. Tyto frézky jsou vybaveny ramenem, na kterém může být upevněno jedno či dvě opěrná ložiska pro podepření frézovacího trnu. Pokud je podélný stůl otočný ve vodorovné rovině o $\pm 45^\circ$, potom mluvíme o frézce univerzální [1].



Obrázek 3.5: Vodorovná konzolová frézka [1].

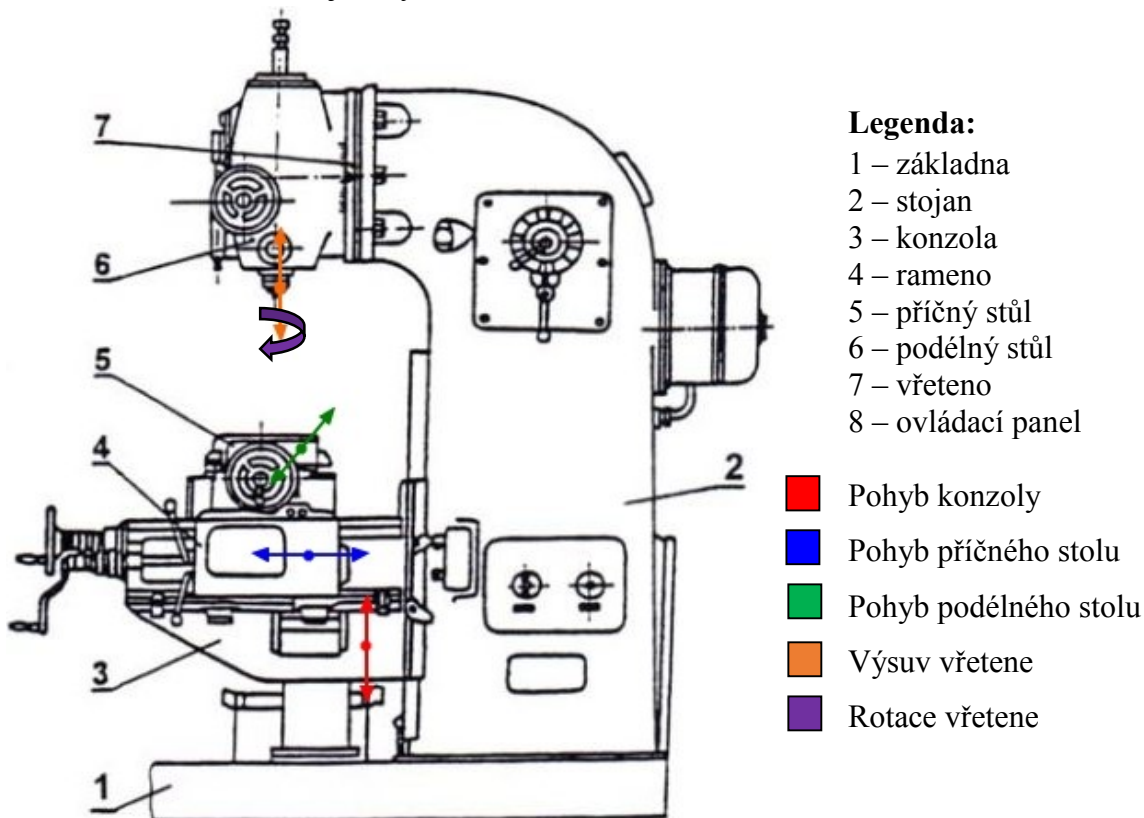


Obrázek 3.6: Otočný stůl univerzální frézky [5].



3.2.2 Svislé konzolové frézky

Mají vřeteno ve svislém směru, tedy kolmo na pracovní stůl. Vřeteno je uloženo ve svislé hlavě připevněné ke stojanu, v univerzální hlavě nebo přímo ve stojanu stroje. Vřeteno bývá výškově přestavitelné. Univerzální hlava svojí rotací umožňuje na svislé frézce pracovat pod úhlem či natočit osu vřetene až do vodorovného směru. To lze k prospěchu užít při výrobě tvarových, většinou šikmých ploch. Frézy menšího průměru s válcovou stopkou se upínají pomocí kleštin do pouzdra s kuželovým zakončením (viz obrázek 3.8b), stopky kuželové s použitím redukčních pouzder. Nástroje nástrčné (většinou většího průměru) se upínají pomocí frézovacích trnů, zajištěny maticemi.



Obrázek 3.7: Svislá konzolová frézka [1].



Obrázek 3.8: Univerzální hlava [27].

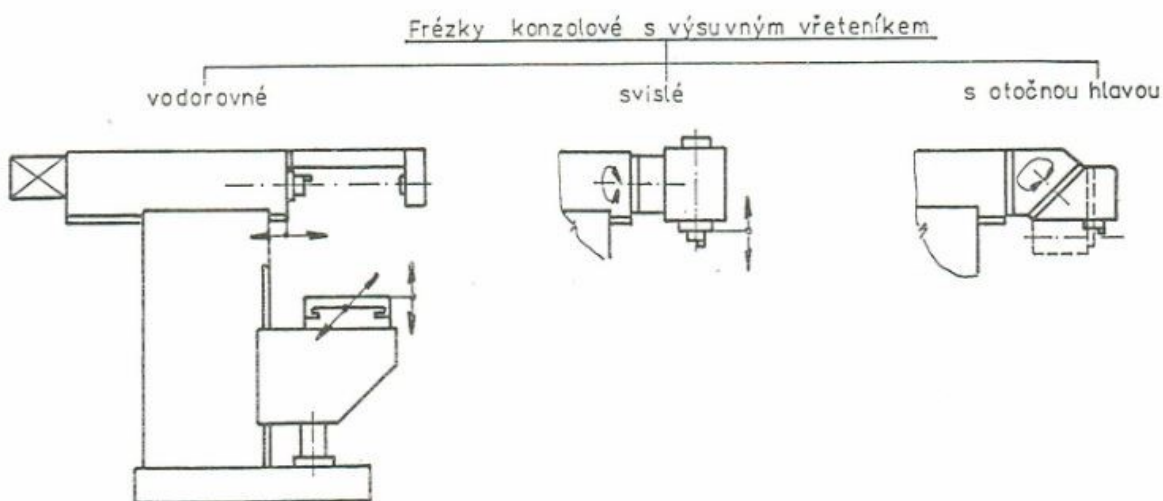


Obrázek 3.9: Upínání nástrojů:
a) redukční pouzdro [26]
b) pouzdro s kleštinou [25].



Nevýhodou běžných konzolových frézek je nižší tuhost, což způsobuje především poměrně velké vyložení konzoly.

Zvýšení tuhosti poskytují **konzolové frézky s výsuvným vřetením** a to díky menšímu vyložení konzoly, jelikož příčný posuv zde koná vřeteník. Díky vyšší tuhosti lze vhodným nástrojem frézovat s rychlejšími posuvy, či odebírat větší tloušťku třísky. Konstrukční varianty tohoto typu frézek jsou stejné jako u běžných konzolových: vodorovné, svislé a s otočnou hlavou, viz obrázek 3.10 [5].

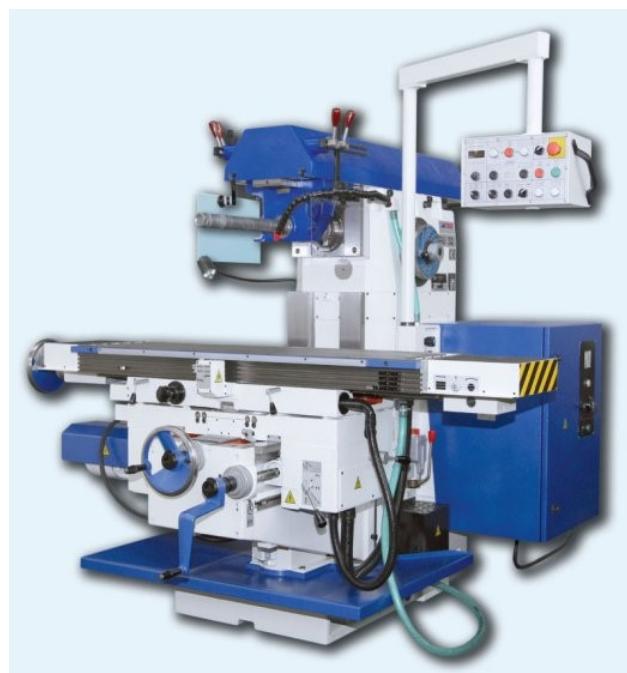


Obrázek 3.10: Varianty konzolových frézek s výsuvným vřetením [5].

Zástupcem skupiny konzolových frézek je např. **vodorovná konzolová frézka TOS Olomouc FGU 32**, viz obrázek 3.11. Jelikož je zde možné natáčet podélný stůl, lze frézku označit také jako *univerzální*. Maximální zatížení stolu je 250 kg, tudíž lze frézovat i větší skříňové obrobky [6].

Vybrané vlastnosti a parametry stroje:

- Plynulé posuvy ve 3 osách pomocí frekvenčního měniče i ruční kola s číselníky s dělením 0,02 mm
- Digitální odměřování polohy značky Heidenhein
- Podélný stůl 360 x 1400 mm
- Výkon motoru vřetene: 5,5 kW
- 12 převodových stupňů
- Základní rozsah ot.: 31,5 – 1400 min⁻¹
- Zvýšený rozsah ot.: 45 – 2000 min⁻¹
- Hmotnost: 2900 kg



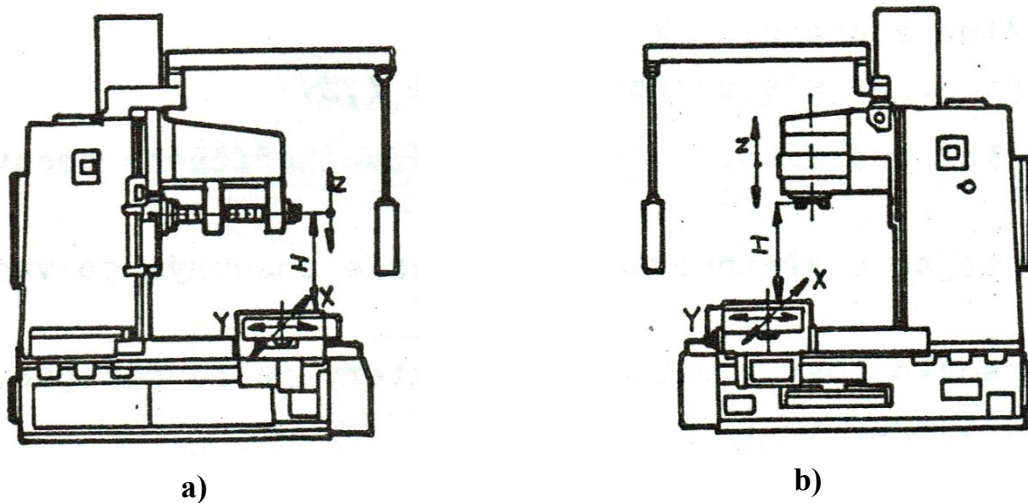
Obrázek 3.11: Vodorovná konzolová frézka TOS Olomouc FGU 32 [6].



3.3 Stolové frézky

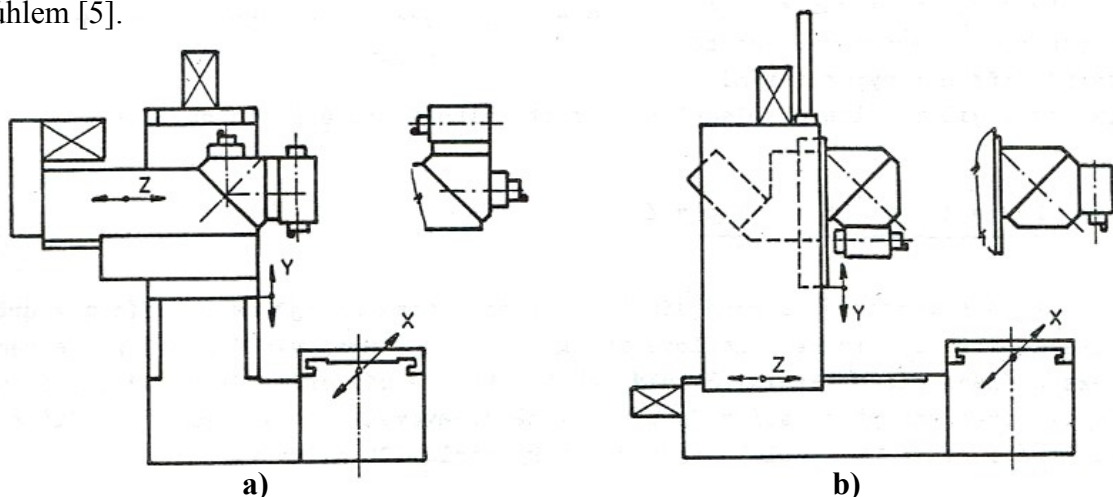
Jsou často nazývané ložové, jejich hlavní částí je masivní pracovní stůl pro upnutí obrobku, vybaven příčným a podélným suportem. Stroj není vybaven konzolou, stojan je připevněn přímo ke stolu a svislý pohyb zde vykonává vřeteník ve vedení na stojanu. Pevný stůl s neměnnou výškou pracovní plochy zajišťuje vysokou tuhost a pracovní přesnost, v porovnání s konzolovými frézkami. Zatížitelnost stolu bývá vyšší a lze frézovat větší obrobky. Stolové frézky jsou převážně vybaveny CNC řízením [5].

Konstrukční provedení strojů běžné koncepce je na obrázku 3.12.



Obrázek 3.12: Provedení stolových (ložových) frézek běžné koncepce: a) vodorovná, b) svislá [5].

Ve snaze o zvýšení kvality a rychlosti výroby se již od běžné koncepce s křížovým stolem přechází na uspořádání, kdy se stůl pohybuje pouze v jedné ose (osa X). Hlavní výhodou je další zvýšení tuhosti a možnost obrábět větší obrobky s vyšší přesností. Díky stolu s neměnnou výškou jsou u těchto stojů dobré podmínky pro automatizaci výměny nástrojů či odvodu třísek a obecně jsou vhodné pro automatizované provozy. Vybavují se univerzálními vřetenovými hlavami, což umožňuje nastavení vřetene do horizontální nebo vertikální polohy, či práci pod úhlem [5].



Obrázek 3.13: Novější koncepce stolových frézek: a) s posuvným vřeteníkem, b) s posuvným stojanem [5].



Na obrázku 3.14 je stolová frézka Knuth KB 1400. Je to stroj běžné koncepce, jelikož využívá křížový stůl (pohybuje se v osách X a Y). Ve svislé ose Z se pohybuje vřeteník po vedení stojanu. [7].

Vybrané vlastnosti a parametry stoje:

- Kalené a broušené vodící plochy všech os
- Robustní stůl ze šedé litiny
- Otočná frézovací hlava o $\pm 30^\circ$
- Indikace polohy ve 3 osách
- Centrální mazání



Obrázek 3.14: Stolová frézka Knuth KB 1400 [7].

3.4 Rovinné frézky

Jsou určeny pro obrábění největších obrobků, především rovinných ploch. Hlavním znakem je dlouhý pracovní stůl (i několik metrů), který koná podélný posuv (osa X). Příčný a svislý posuv koná vřeteník, konkrétně záleží na typu konstrukce. Rovinné frézky obvykle používají vysokovýkonné pohony vřetene a vyznačují se velmi vysokou tuhostí a dobrou přesností. Je možné doplnit je celou řadou příslušenství (např. dopravníky třísek, univerzální vřetenové hlavy) a existují v mnoha konstrukčních variantách, v současnosti hojně jako CNC stroje.

Základní konstrukční rozdělení:

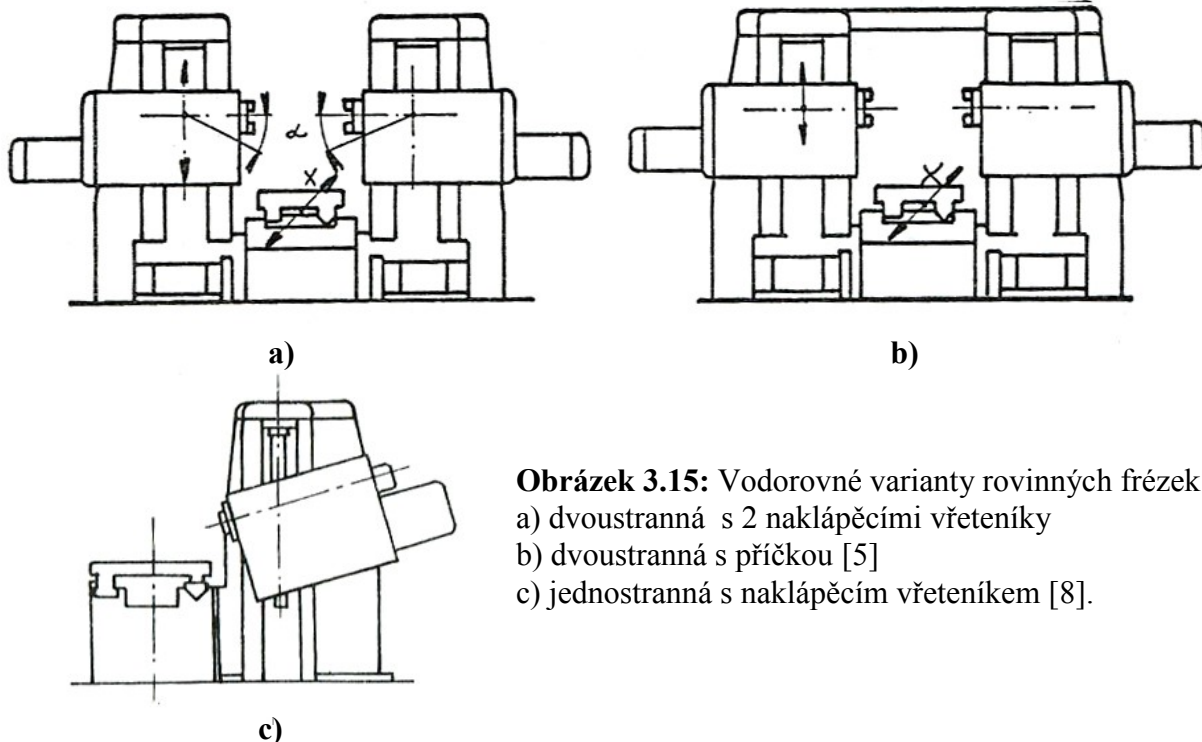
- Vodorovné
- Portálové
- S výložníkem

3.4.1 Vodorovné rovinné frézky

Osa vřetene je v horizontálním směru, používají se především k frézování svislých ploch čelními frézami nebo frézovacími hlavami. Nejčastější je provedení oboustranné s přestavitelnými vřeteníky na stojanech. Pro zvýšení tuhosti je možno stroj doplnit příčkou spojující oba stojany [5].

Lze rozlišit tyto typy:

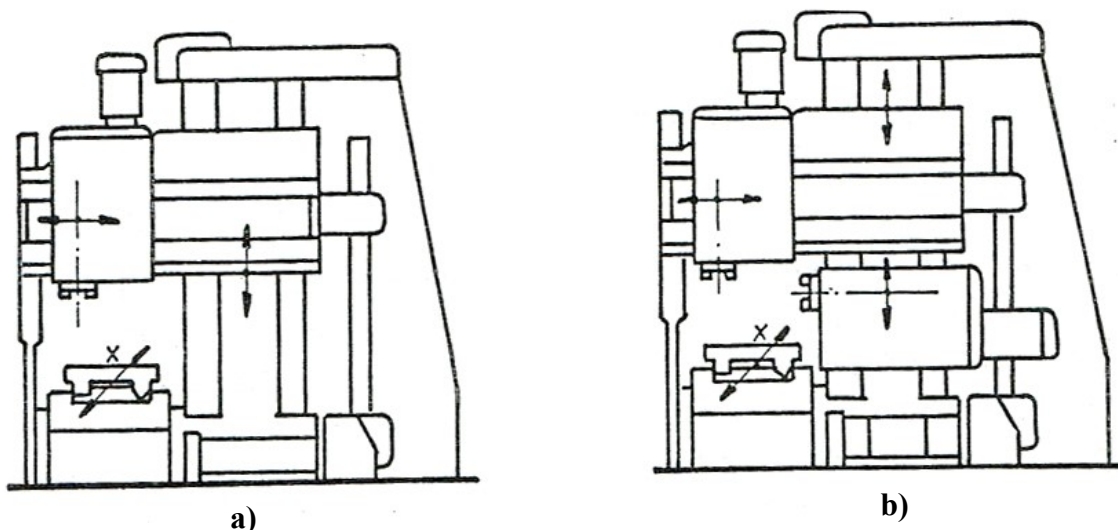
- bez/s přestavitelným, naklápěcím vřeteníkem
- jednostranné/dvoustranné
- bez/s příčkou.



Obrázek 3.15: Vodorovné varianty rovinných frézek:
a) dvoustranná s 2 naklápěcími vřeteníky
b) dvoustranná s příčkou [5]
c) jednostranná s naklápěcím vřeteníkem [8].

3.4.2 Rovinné frézky s výložníkem

Tyto stroje mají díky výložníku vylepšené technologické možnosti, dobře lze frézovat vodorovné plochy a používat rozličné typy fréz. Svislý vřeteník je posuvně uložen na výložném rameni (výložníku), které je pro zvýšení tuhosti na volném konci podepřeno pomocným stojanem, či sloupem. Pro další zlepšení technologických možností bývá stroj vybaven vodorovným vřeteníkem posuvným na hlavním stojanu [5].

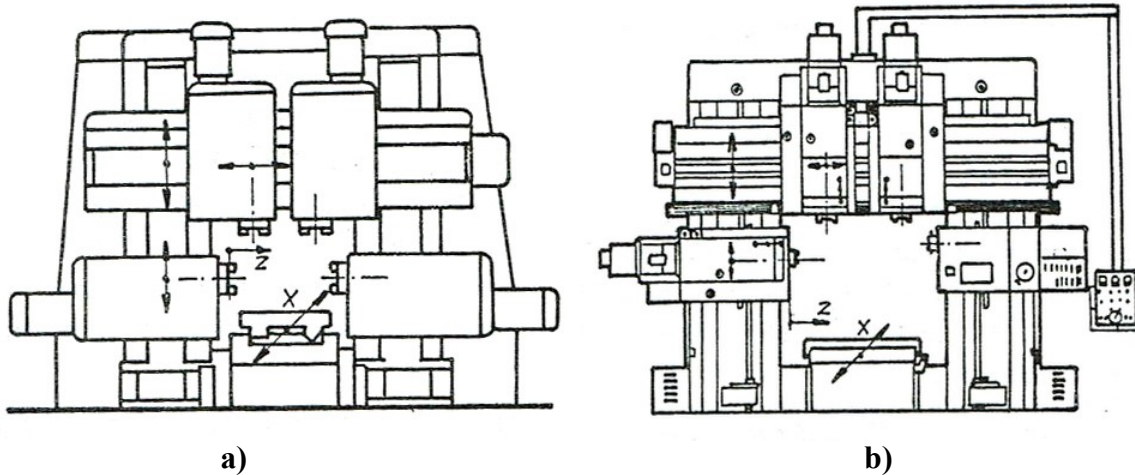


Obrázek 3.16: Rovinné frézky s výložníkem:
a) se svislým vřetenem
b) se svislým a vodorovným vřetenem [5].



3.4.3 Portálové rovinné frézky

Jsou nejpoužívanějším typem rovinných frézek. Mohou být dodávány v různých variantách dle počtu a polohy vřeteníků. Frézka na obrázku 3.16 je vybavena 4 vřeteníky, 2 svislé posuvně uložené na příčnicku a 2 vodorovně posuvně uložené na stojanech. Posuv nástroje do materiálu je realizován vysouváním pinoly s vřetenem v případě *pinolových vřeteníků* nebo posuvem celého vřeteníku v případě *smykadlových vřeteníků*.



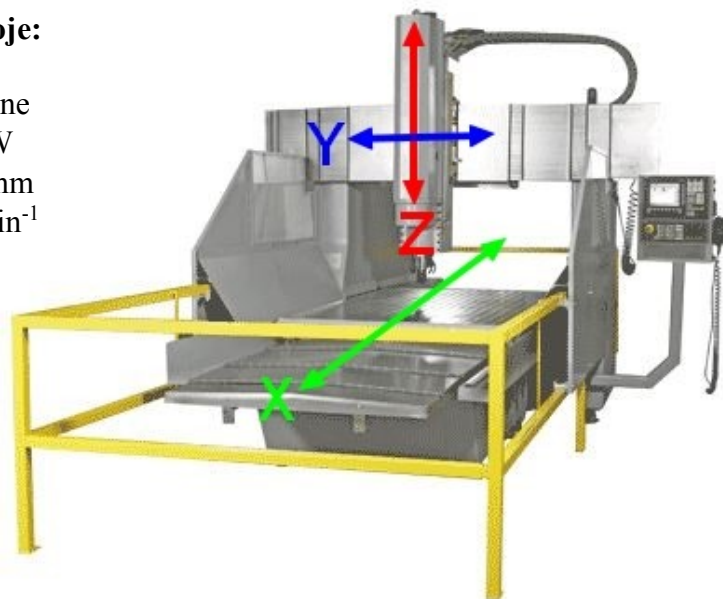
Obrázek 3.17: Varianty portálových frézek:

- a) se 4 pinolovými vřeteníky
- b) se 4 smykadlovými vřeteníky [11].

Jako příklad je na obrázku 3.18 portálová CNC frézka anglické firmy XYZ, typ BRM 50-100/150 jedním svislým vřeteníkem na příčnicku.

Vybrané vlastnosti a parametry stroje:

- Vektorově řízený motor vřetene
- Výkon motoru vřetene: 18 kW
- Velikost stolu: 1220 x 2440 mm
- Max. otáčky vřetene: 8000 min⁻¹
- Hmotnost: 6500



Obrázek 3.18: Portálová CNC frézka XYZ BRM 50-100-150 [28].

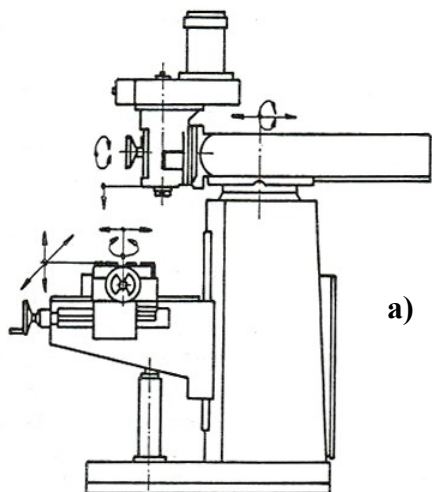


3.5 Speciální frézky

Jsou to stroje určené pro výrobu daného typu obrobku, či pro specifickou operaci. Nyní budou uvedeny základní typy těchto frézek

3.5.1 Nástrojařské frézky

Jsou přizpůsobeny výrobě v nástrojárnách, tedy obrábění složitých tvarů, např. nástrojů, zápusťek, přípravků, či modelů k odlévání. Konstrukčně jsou podobné konzolovým frézám svislým a vodorovným. Mají zvýšenou pohyblivost stolu i vřetena, existují také varianty s naklápěcím pracovním stolem. Pomocí nejrůznějšího příslušenství je možno na těchto strojích taky vrtat, frézovat šroubovice, obrážet, či brousit. Pro přesné najíždění rozměrů bývají osazeny odměřovacími pravítky a indikací polohy [8].

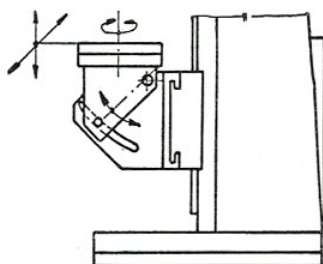


a)

Obrázek 3.19: Varianty nástrojařské frézky

a) běžná koncepce

b) s naklápěcím stolem [5].



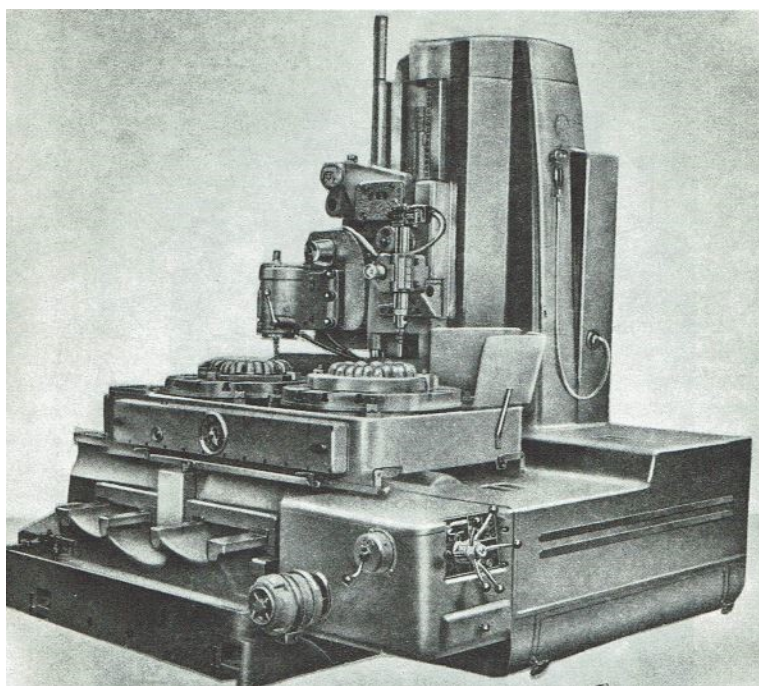
b)

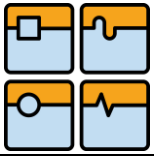
3.5.2 Kopírovací frézky

Slouží především k výrobě složitých tvarových ploch podle šablony nebo vzorového kusu. Mechanismy zajišťující kopírování tvaru jsou mechanické, elektrické, či hydraulické.

V současnosti jsou tyto stroje ve většině případů nahrazeny NC, či CNC stroji [8].

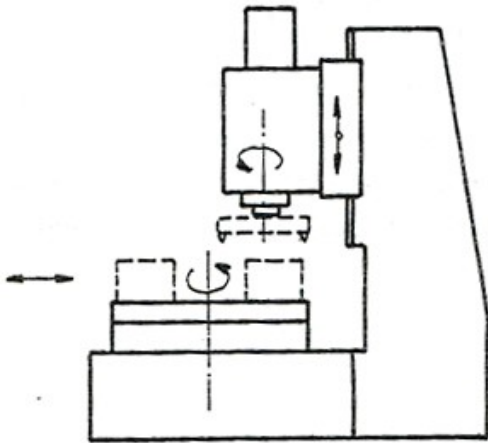
Obrázek 3.20: Kopírovací frézka se svislými vřeteny [8].





3.5.3 Karuselové frézky

Základem karuselové frézky je rotační pracovní stůl se svislou osou a jeden či více svislých frézovacích vřeteníků. Hlavní rotační pohyb koná nástroj, vedlejší rotační pohyb koná kruhový stůl s obrobkem, kdy rychlost otáčení stolu odpovídá pracovnímu posuvu. U dvouvřetenových strojů lze jedním vřeteníkem hrubovat, na druhém současně dokončovat. Takto lze obrábět velmi efektivně především rovinné vodorovné plochy. Využití najdou karuselové frézky především v sériové výrobě [5].



Obrázek 3.21: Dvouvřetenová karuselová frézka [5].

3.5.4 Stroje na výrobu ozubení

Frézování ozubení se provádí dvěma základními způsoby a to dělicím nebo odvalovacím.

Při *dělicím způsobu* je nástrojem stopková tvarová nebo kotoučová (modulová) fréza, jsou určeny sady fréz pro daná rozmezí počtů zubů. Ozubení lze vyrábět na konzolových frézách pomocí konvenčního dělicího přístroje, nevýhodou je menší přesnost.

Odvalovacím způsobem se vyrábí vysoce přesná ozubení pro vysoké obvodové rychlosti. Jedním nástrojem je možno vyrobit ozubení různých počtů zubů, dle nastavení stroje. Základním principem je odvalování boků šroubové frézy po obvodu obrobku, je tedy nutný speciální stroj s přesně spřaženým pohybem nástroje a obrobku, tzv. odvalovací frézka.



a)



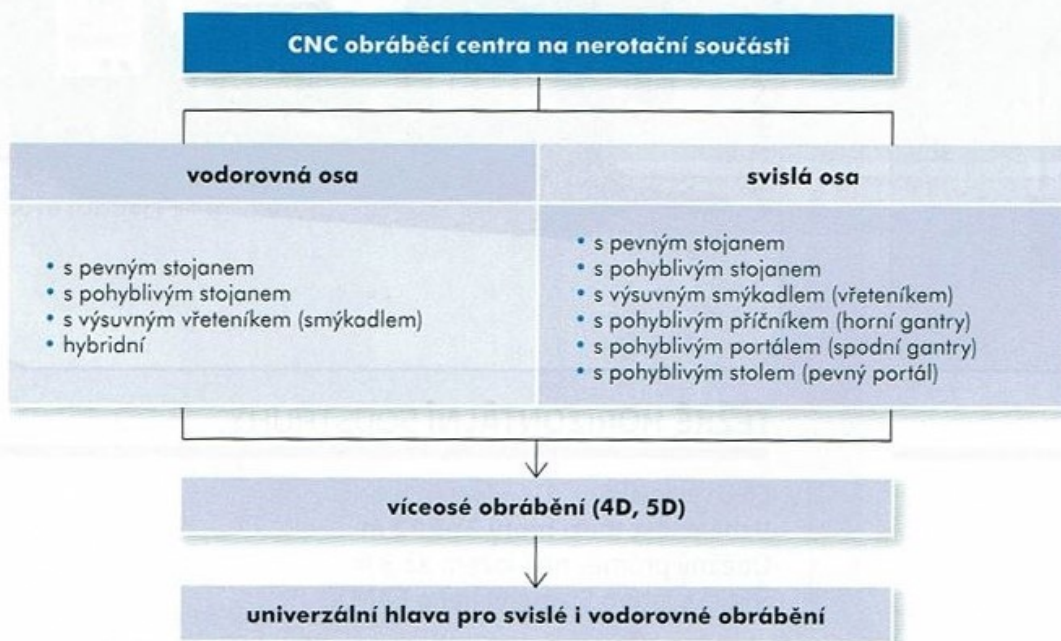
b)

Obrázek 3.22: Výroba ozubení odvalovacím způsobem
a) odvalovací frézka TOS [29], b) detail výroby ozubení [30].

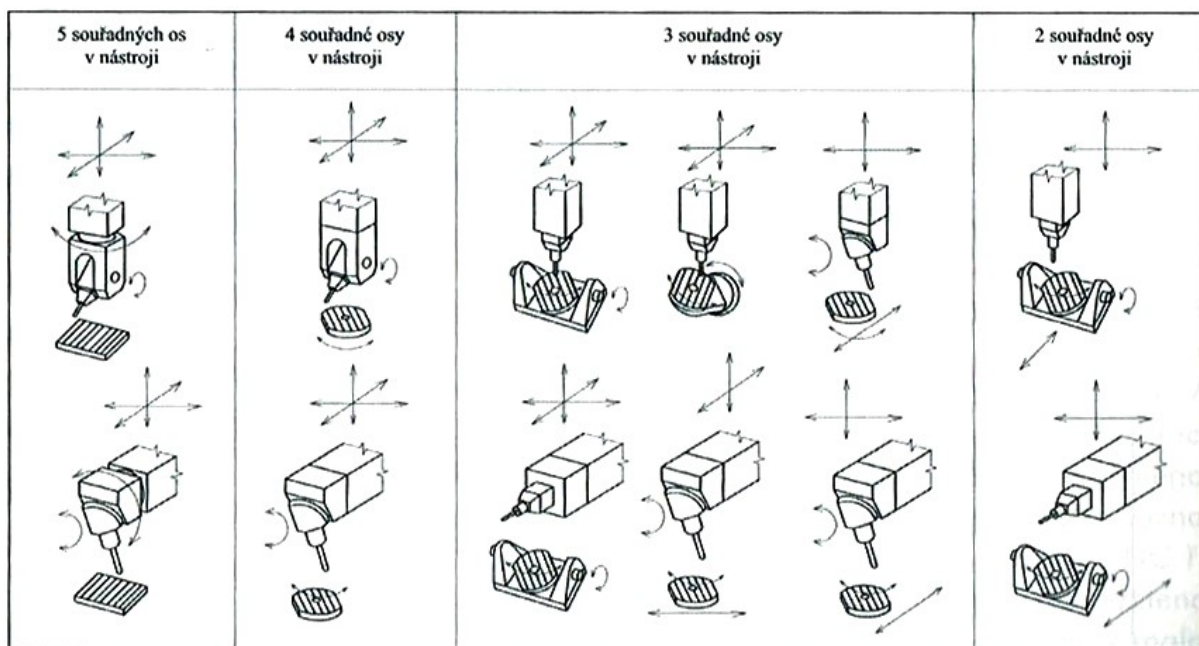


3.6 CNC stroje

V předešlém textu byly uvedeny rozličné typy frézovacích strojů. Většinu s nich ovládá člověk – operátor s malou automatizací pomocí strojních posuvů. Tyto stroje nazýváme *konvenční*. Další skupinou jsou CNC stroje, neboli číslicově řízené, které v posledních letech nahrazují stroje konvenční. Pro CNC stroje obecně určené k frézování a schopné vrtání, řerání závitů atd. se ustálil název *CNC obráběcí centra*. V dalším textu budeme uvažovat *CNC obráběcí centra na nerotační součásti*, které byly vyvinuty z konvenčních, později NC frézek a postupně je nahrazují.



Obrázek 3.23: Rozdělení CNC obráběcích center na nerotační součásti dle [9].



Obrázek 3.24: Třídění víceosých CNC center pro nerotační součásti dle počtu os [9].



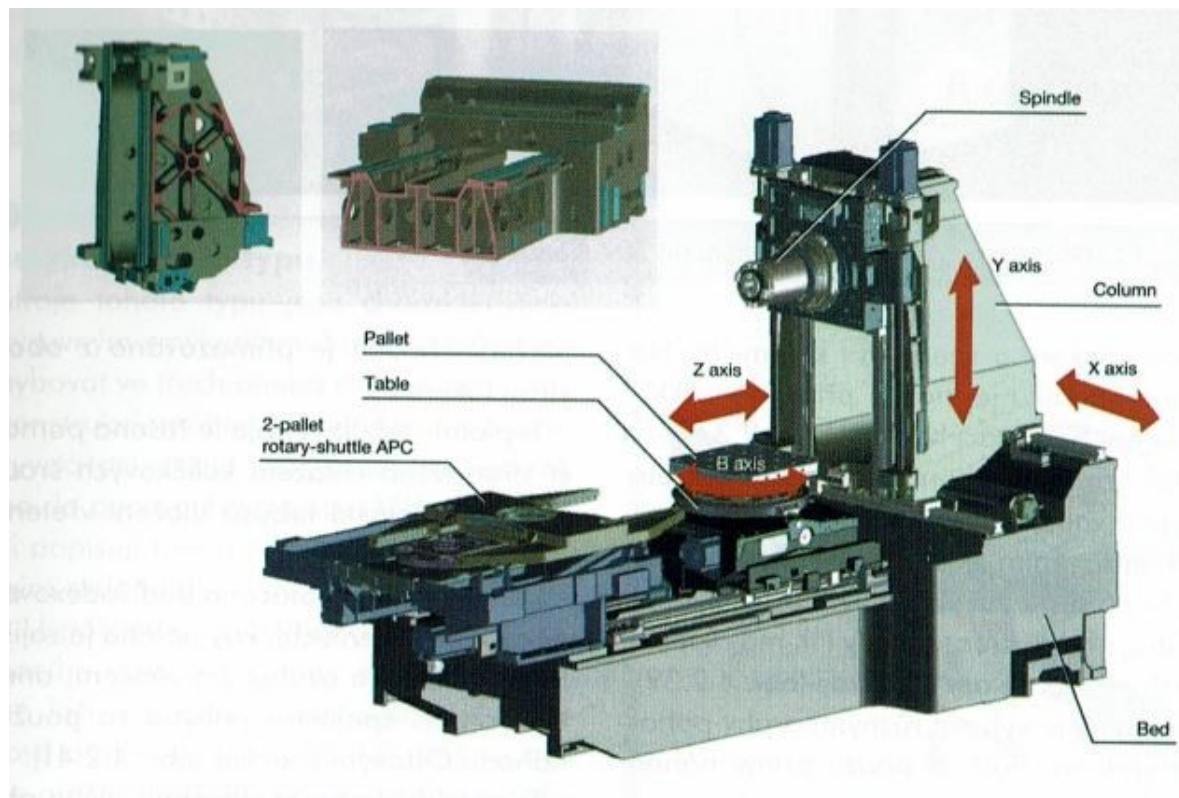
3.6.1 Stroje s vodorovnou osou vřetene

Je to nejpoužívanější typ OC⁵, hlavně kvůli těmto vlastnostem:

- Možnost obrábění s více stran
- Vyšší tuhost vřetene – daná menším vyložением
- Lepší odchod třísek
- Dobrá možnost automatizace (např. výměny obrobku, atd.)

Existují v provedení jako tři až pětiosé stroje, na kterých lze nejen frézovat, ale i vrtat, vyvrtávat, řezat závity atd., označují se jako multiprofesní. Nosná část je většinou rozdělena na neměnnou nástrojovou část s třemi kolnými řízenými osami značenými X, Y, Z a na stavebnicově proměnnou obrobkovou část se dvěma rotačními osami značenými A, B, které představují rotace stolu okolo příslušných os.

Dostupná jsou též modifikovaná provedení s dvěma osami X a Y v nástrojové části a třemi osami Z, A a B v obrobkové části. Variabilita obrobkové části umožňuje např. stavbu stroje s pevnou upínací deskou pro obrábění těžkých a rozměrných obrobků (X, Y a Z) nebo stroje s otočným stolem (osy X, Y, Z a B) či pětiosého stroje (osy X, Y, Z, A a B). Nástrojová část všech uvedených konfigurací je mimo dosah třísek [9], [1].



Obrázek 3.25: Odkrytované vodorovné OC značky Okuma, řady MA [9].

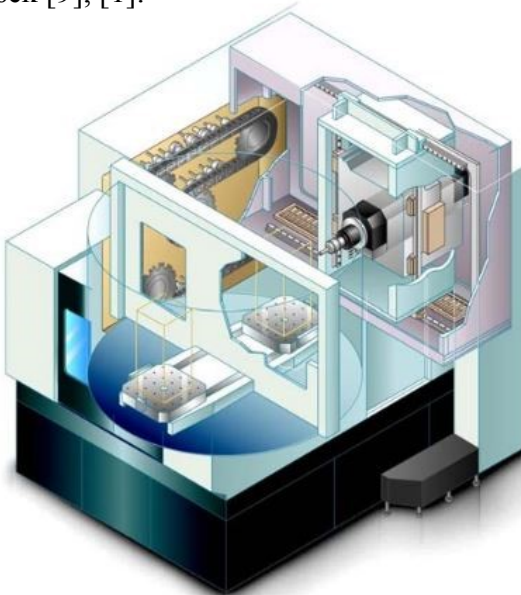
⁵ OC – obráběcí centrum.



3.6.2 Stroje se svislou osou vřetene

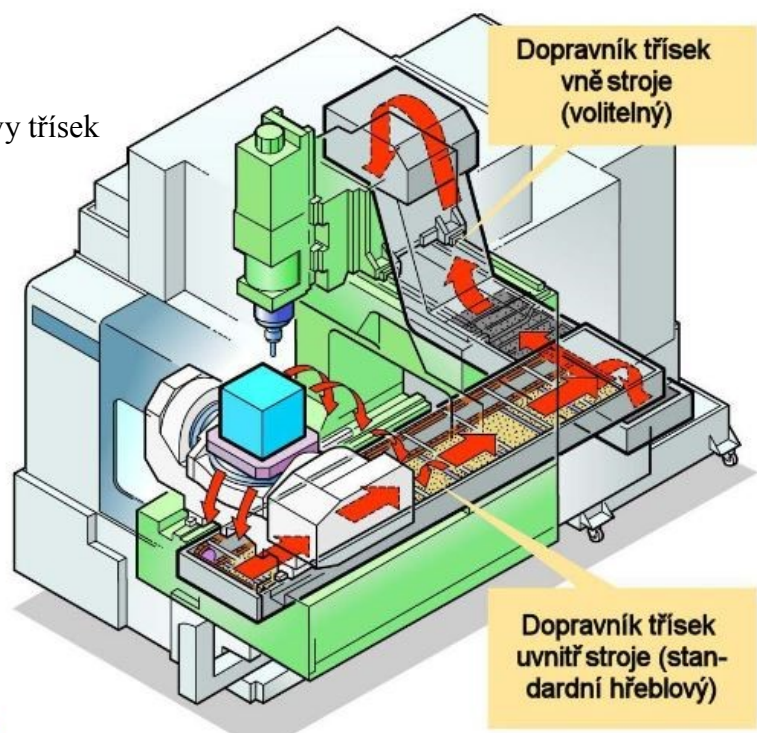
Jsou výhodné pro obrábění plochých, deskovitých součástí. Výhodou je jednodušší upínání obrobku (vnější síly působí proti dosedací ploše) i polohování vůči vodorovným OC a často také nižší cena.

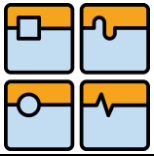
Vřeteno s třemi ovládanými osami značenými X, Y, Z je umístěno na pojízdném portálu (existují též varianty s dvěma ovládanými osami X a Z, které mají v obrobkové části řízené osy Y, A a C - obr.7.24). Obrobková část je proměnná a může mít prostý pevný stůl s vodorovnou upínací plochou, otočný „dvojstůl“ s krytem proti třískám pro upínání následné součásti během obrábění, stůl nebo dvojstůl s otočnými vícenásobnými upínači, nebo otočný a sklopný stůl se dvěma otočnými osami A, B pro plnohodnotné pětiosé obrábění. Vertikální frézovací centra (stejně též horizontální) jsou často doplněny zařízením pro kontinuální odvod třísek [9], [1].



Obrázek 3.26: Svislé obráběcí centrum DMG Moki Seiki HVM 630 [1].

Obrázek 3.27: Ukázka dopravy třísek na stroji Moki Seiki [1].





4 Vřetena frézovacích strojů

Vřeteno obráběcího stroje je jedním ze základních součástí, které mají velký vliv na přesnost obrobku. Během řezného procesu je prostorově namáháno a jeho návrh je tedy nutné podložit vhodnými výpočty.

4.1 Popis a funkce vřetene

U frézovacích strojů, či u CNC obráběcích center na nerotační součásti je funkcí vřetena zaručit obrobku přesný otáčivý pohyb, tj. takový při němž se dráhy jednotlivých bodů obrobků nebo nástroje liší od kružnice jen v přípustných mezích. Funkce vřetena je zde shodná s funkcí kruhového vedení a vřeteno se od něho liší pouze tvarem [9].

Dle základní konstrukce rozlišujeme 2 základní typy vřeten:

- Skříňové vřeteno
- Tubusové vřeteno



a)



b)

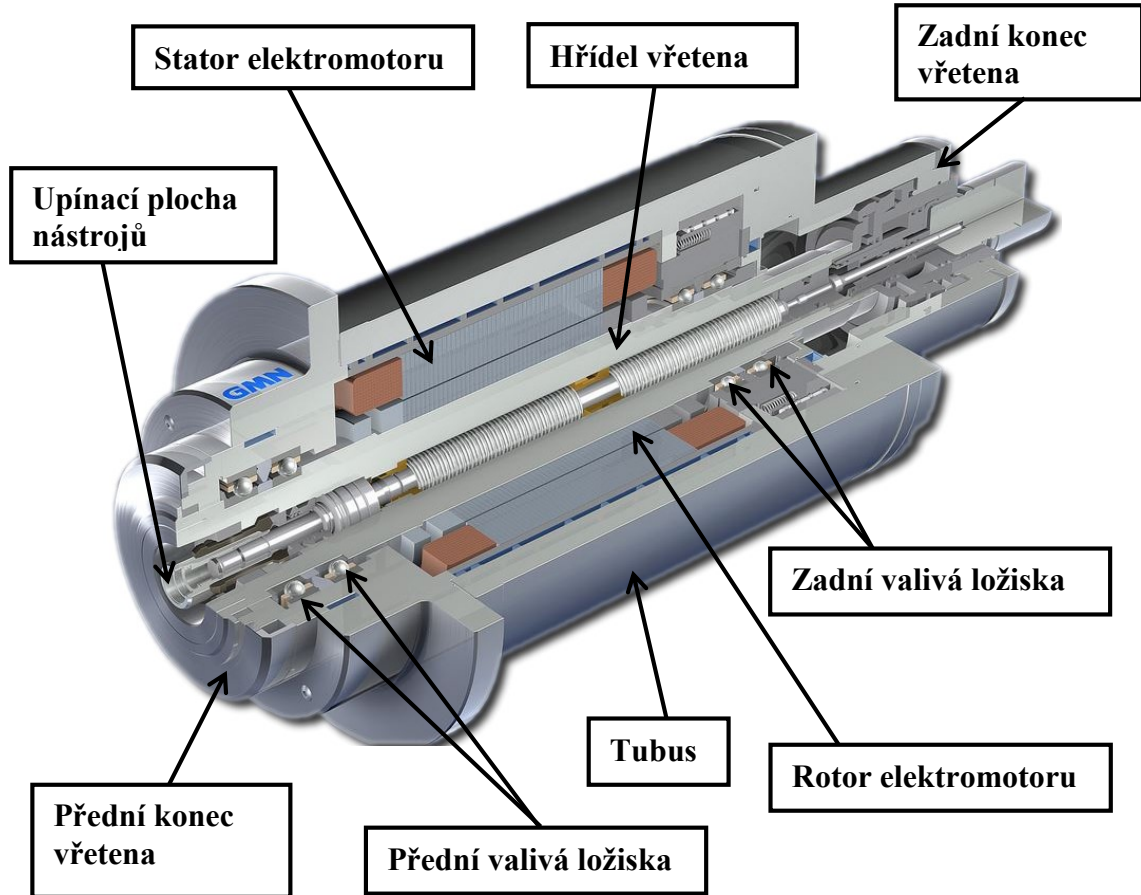
Obrázek 4.1: Elektrovřetena firmy Omlat

a) skříňové zástavby

b) tubusové zástavby [31].

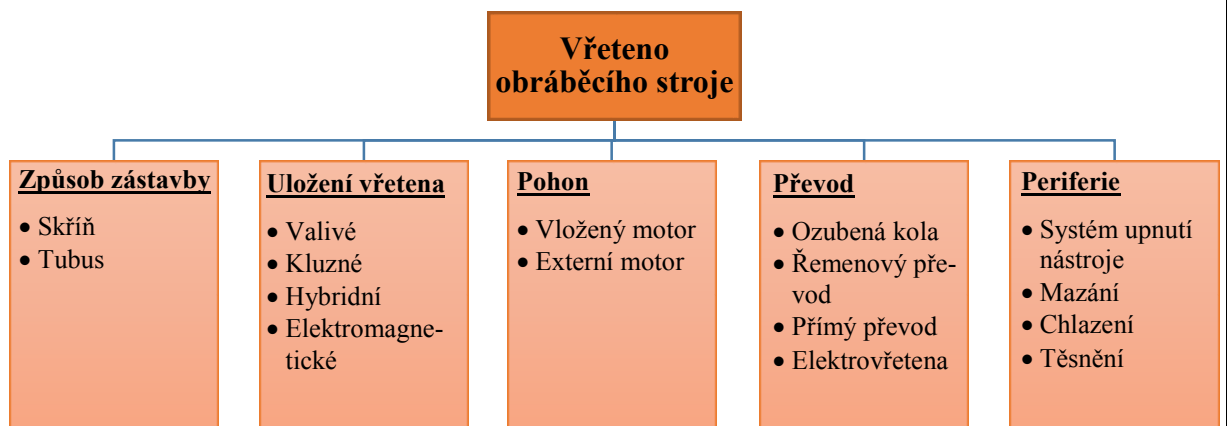


Popis základních částí provedeme na tubusovém elektrovřetenu v řezu:



Obrázek 4.2: Elektrovřeteno GMN v řezu [32].

Přední konec vřetena je část běžně viditelná při chodu stroje, upínací plocha nástrojů bývá nejčastěji kuželová (různé úhly kuželů). Elektromotor je zde součástí tubusu, stator je pevně připevněn k hřídeli vřetena. Ložiska bývají valivá, deailněji o nich bude uvedeno v dalším textu, stejně jako o příslušenství (periferie) vřeten.



Obrázek 4.3: Morfologie vřetena [9].

4.2 Obecné požadavky na vřetena

Vřeteno se svým způsobem uložení, typem zástavby, pohonem je zásadním konstrukčním uzlem ovlivňující pracovní přesnost a výrobnost obráběcího stroje. Z tohoto důvodu jsou na něj klady náročné požadavky:

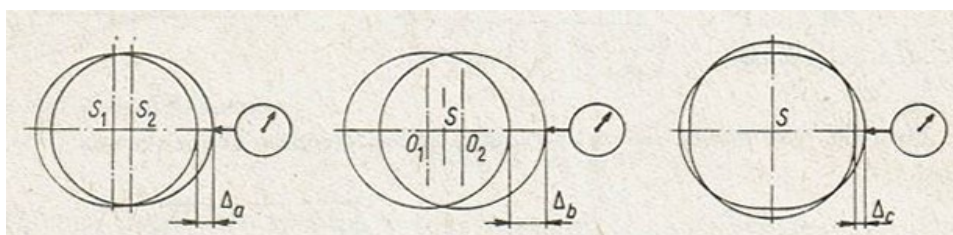
- ✓ *vysoká přesnost chodu* – je určena velikostí tzv. radiálního a axiálního házení
- ✓ *dokonalé vedení* – vřeteno nesmí měnit polohu v prostoru, mění-li jeho zatížení směr nebo velikost
- ✓ *dokonalé uložení* – co nejmenší ztráty v uložení (tepelné dilatace atd.), vlivem velkých ztrát se snižuje účinnost a nežádoucím způsobem se mění funkce stroje
- ✓ *dostatečná tuhost* – neboli poměrně malé deformace při zatížení, čehož lze docílit především předepnutím vřetene (ložisek)
- ✓ *dynamická stabilita* – odolnost vůči kmitání, návrh se zahrnutím vlastních frekvencí, kmitání má nežádoucí vliv na strukturu povrchu obrobku a to hlavně u OC na nerotační součásti, neboť síly vznikající při jejich práci jsou periodicky proměnné [10].

4.2.1 Přesnost chodu vřetena

Kontroluje se na předním konci vřetena na ploše, které má přímý vliv na přesnost otáčení nástroje nebo obrobku, což je v případě OC na nerotační součásti *upínací plocha nástroje* (většinou kuželové dle normy, viz obrázek 4.2).

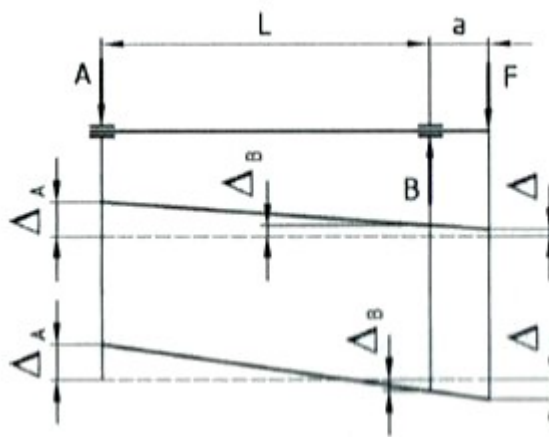
Nepřesný chod vřetene je způsoben především házením některých jeho součástí. Radiální házení je způsobeno:

- *nepřesností rotace vřetena* – jeho osa mění během jedné otáčky polohu mezi dvěma body což, bývá zapříčiněno házením jednoho nebo obou ložisek
- *nesouosostí plochy, na níž měříme, s osou otáčení* – způsobeno nepřesností výroby
- *neokrouhlým tvarem měřené plochy* – neboli nevyhovující geometrická úchylka kruhovitosti, opět způsobena nepřesností při výrobě [10].



Obrázek 4.4: Radiální házení vřetena

- a) nepřesnost rotace vřetena
- b) nesouosost plochy s osou rotace
- c) nevyhovující kruhovitost [10].



Obrázek 4.5: Vliv házení ložisek na přesnost chodu vřetene [4].

Radiální házení naměřené úchylkoměrem je složeno z uvedených 3 složek. Pokud omezíme ve výrobě poslední 2 složky na minimum, bude radiální, resp. axiální házení vřetene způsobeno radiálním, resp. axiálním házením ložisek uložení. Tento vliv je závislý na velikosti poměru vyložení vřetena a ke vzdálenosti ložisek L . Pokud je házení předního ložiska Δ_B a zadního Δ_A stejného smyslu a velikosti, pak platí podle obrázku 4.5 tato rovnice:

$$\frac{\Delta_A - \Delta}{\Delta_B - \Delta} = \frac{L + a}{a} \quad [4], \quad (4.1)$$

po úpravě, bude-li házení obou ložisek v jedné rovině a opačných smyslů, bude největší výsledné házení na předním konci vřetena:

$$\Delta = \Delta_B + \frac{a}{L} \cdot (\Delta_B + \Delta_A) \quad [4], \quad (4.2)$$

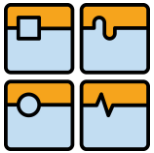
Axiální házení se měří na čelní ploše vřetena a je způsobeno axiálním házením ložisek či nedokonalou kolmostí čelní plochy o ose rotace. Axiální házení příruby je možno zmenšit obrobáním po montáži do stroje.

4.2.2 Tuhost a deformace vřetena

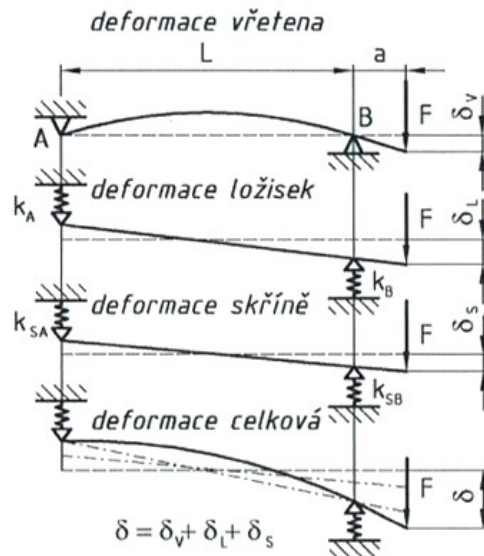
Vysoká tuhost neboli odolnost proti deformaci je nezbytná pro přesné obrábění. Přesnost chodu vřetena, získaná vysokou přesností při výrobě jeho součástí může být ztracena malou tuhostí. Obvykle se udává tuhost vřetena na jeho předním konci, kde je upínán nástroj, neboť deformace v tomto místě nejvíce ovlivňuje jakost práce. Celková deformace vřetena je:

$$\delta = \delta_v + \delta_L + \delta_s \quad [4], \quad (4.3)$$

kde: δ_v – deformace vřetena,
 δ_L – deformace ložisek vlivem reakcí,
 δ_s – deformace tělesa vřeteníku.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Obrázek 4.6: Vliv házení ložisek na přesnost chodu vřetene [4].

Deformaci vřetena δ_v lze za předpokladu dokonale radiálně tuhých ložisek, u kterých je dovoleno naklonění vyjádřit rovnicí:

$$\delta_v = \frac{F \cdot a^2}{3 \cdot E} \cdot \left(\frac{L}{J_1} + \frac{a}{J_2} \right) \quad [4], \quad (4.4)$$

kde: F – výsledná řezná síla,
 a – délka převislého konce,
 E – modul pružnosti v tahu,
 L – vzdálenost mezi ložisky,
 J_1 – moment setrvačnosti části vřetena mezi ložisky,
 J_2 – moment setrvačnosti převislé části vřetena.

Složku δ_L , neboli deformaci ložisek lze za podmínky dokonale tuhého vřetena vypočítat:

$$\delta_L = \frac{F}{L^2} \cdot \left[a^2 \cdot C_A + (a+L)^2 \cdot C_B \right] \quad [4], \quad (4.5)$$

kde: C_A – poddajnost zadního ložiska,
 C_B – poddajnost předního ložiska.

Poslední složku, deformaci tělesa vřetenu δ_s lze určit jen pro velmi jednoduchá tělesa. V rovnici ji tedy dále neuvažujeme a celková deformace na konci vřetene je:

$$\delta = \delta_v + \delta_L \quad [4], \quad (4.6)$$

s dosazením

$$\delta = \frac{F \cdot a^2}{3 \cdot E} \cdot \left(\frac{L}{J_1} + \frac{a}{J_2} \right) + \frac{F}{L^2} \cdot \left[a^2 \cdot C_A + (a+L)^2 \cdot C_B \right] \quad [4]. \quad (4.7)$$



Při detailním pohledu na rovnici (4.7) vidíme, že se člen vyjadřující δ_V se zmenšující se vzdáleností L mezi ložisky zmenšuje, naopak deformace δ_L narůstá. Pro každé konkrétní vřeteno tedy existuje určitá *optimální vzdálenost ložisek*, které přísluší nejmenší možná celková deformace konce δ .

Tuto optimální vzdálenost najdeme stanovením minima funkce $\delta = f(L)$. Derivaci deformace podle délky položíme rovnu nule:

$$\frac{d\delta}{dL} = 0 = -\frac{2 \cdot a^2}{L^3} \cdot (C_A + C_B) - \frac{2 \cdot a}{L^2} \cdot C_B + \frac{a^2}{3 \cdot E \cdot J_1} \quad [11], \quad (4.8)$$

úpravou dostaneme kubickou rovnici

$$L^3 - \frac{6 \cdot E \cdot J_1 \cdot L}{a} \cdot C_B - 6 \cdot E \cdot J_1 \cdot (C_A + C_B) = 0 \quad [11], \quad (4.9)$$

která odpovídá schématu

$$x^3 + q \cdot x + r = 0 \quad [11], \quad (4.10)$$

kde:

$$q = -\frac{6 \cdot E \cdot J_1}{a} \cdot C_B \quad [11] \quad \text{a} \quad r = -6 \cdot E \cdot J_1 \cdot (C_A + C_B) \quad [11]. \quad (4.11), (4.12)$$

Tato rovnice má 3 kořeny, z nichž pouze jeden je reálný a má význam

$$x_1 = u + v \quad (4.13)$$

kde:


$$u = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \cdot r + \sqrt{z}} \quad ; \quad (4.14)$$

$$v = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \cdot r - \sqrt{z}} \quad ; \quad (4.15)$$

$$z = \frac{1}{4} \cdot r^2 + \frac{1}{27} \cdot q^3 \quad . \quad (4.16)$$

Tuto rovnici lze řešit též graficky, jak je naznačeno v [11]. Je také vhodné připomenout, že rozhodující vliv na kvalitu vřetena má především:

- vzdálenost ložisek L
- tuhost vřetene – co nejvyšší J_1, J_2
- tuhost uložení – co nejmenší C_A, C_B .

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 36
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

4.3 Uložení vřetene

Vřetena obráběcích strojů jsou uložena v ložiscích, která umožňují hladký rotační pohyb a především zachycují působící síly. Obecně platí, že *velká tuhost vřetene* (daná tuhostí uložení a tím i ložisek) není možná při *vysoké frekvenci otáčení*. Výsledné řešení bývá kompromisem mezi těmito dvěma požadavky.

Existují kombinace různých typů uložení, které vychází z těchto základních:

- valivá uložení
- kluzná uložení
- elektromagnetická uložení [9].

4.3.1 Valivá uložení

Drtivá většina vřeten obráběcích strojů je v současnosti ukládána do valivých ložisek. Obecně je návrh uložení náročná úloha, z matematického hlediska je to řešení staticky neurčitých systémů. Lze je řešit pomocí soustav nelineárních diferenciálních rovnic, jejichž výsledky se dobře shodují s experimenty. Výrobci vřeten jsou vybaveni speciálními softwary, při jejich absenci se často spoléhají na intuici a dle zkušeností dávají přednost osvědčeným uloženíům. [9]

V porovnání s kluzným uloženíím jsou valivá ložiska účinnější, nabízí malý součinitel tření a lze prakticky zcela eliminovat vůli v ložiscích. Další nespornou výhodou je obrovský sortiment nejrozličnějších typů ložisek. Obecně také platí, že s rostoucím průměrem ložiska klesá jeho maximální frekvence otáčení.

Základní dělení ložisek dle konstrukce je na:

- radiální ložiska – k zachycení sil kolmo k ose rotace
- axiální ložiska – zachycují síly působící v ose
- ložiska s kosoúhlým stykem – zachycují kombinace osových a radiálních sil.

Ve vřetenech obráběcích strojů jsou nejpoužívanějšími tyto typy:

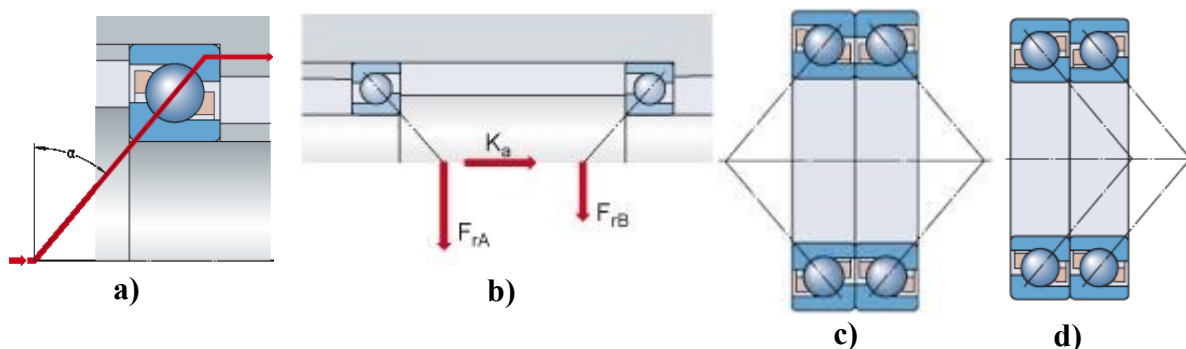
- axiální ložiska
 - ✓ jednosměrná kuličková
 - ✓ obousměrná kuličková
 - ✓ axiální kuličková s kosoúhlým stykem
- radiální ložiska
 - ✓ jednořadá válečková
 - ✓ dvouřadá válečková
 - ✓ kuličková (výjimečně)
- ložiska pro zachycení kombinovaných sil
 - ✓ kuželíková
 - ✓ kuličková s kosoúhlým stykem (radiální)

Dle přesnosti lze rozlišovat

- Ložiska standardních přesností
- Vysoce přesná ložiska



Kuličková ložiska s kosouhlým stykem se vyrábí ve variantách axiálních i radiálních. Oba typy dokáží přenášet radiální i axiální zatížení, dominantně však radiální ložisko přenáší radiální zatížení, obdobně pro ložisko axiální. Míra únosnosti vedlejší zátěže (axiální zatížení pro radiální ložisko a naopak) narůstá se stykovým úhlem α , s kterým také klesá max. frekvence otáčení. Ve vřetenech OS⁶ jsou v současnosti nejpoužívanější radiální kuličková ložiska s kos. stykem, především z důvodu velmi rozsáhlé nabídky variant. I při působení pouze radiální síly v ložisku vzniká síla axiální a to vlivem rozkladu působící radiální síly. Je tedy nutné tato ložiska montovat do páru, k zachycení těchto složek sil. Pro zvýšení tuhosti a únosnosti je možné ložiska montovat ve více kusech u sebe (sdružení ložisek) [9].

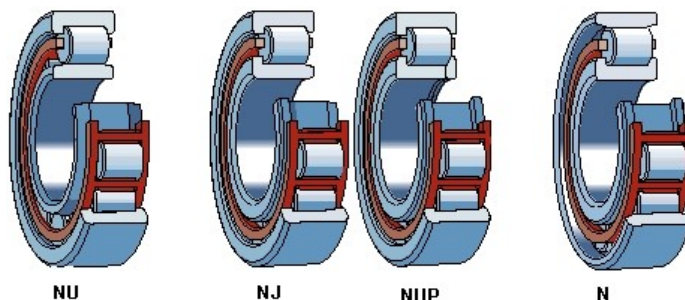


Obrázek 4.7: Kuličková ložiska s kosouhlým stykem

- stykový úhel ložiska α
- ložiska montovaná do „X“ s osovou složkou radiální síly
- sdružená ložiska do „O“
- sdružená ložiska do „X“ [13].

Radiální válečková ložiska přenáší radiální zatížení a vyrábí se v různých variantách dle úpravy kroužků (N, NN, NUP atd.), určitou úpravou přenesou i malé axiální zatížení. Jejich výhodou je relativně velká únosnost při malém průměru. Poskytují uložení dostatečnou tuhost a používají se v kombinaci s axiálními ložisky.

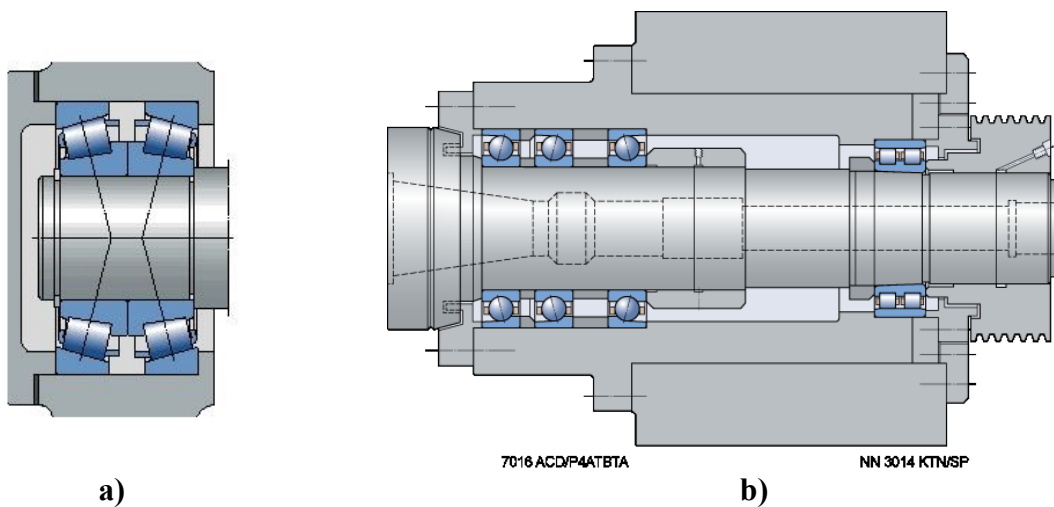
Vyrábí se též jako víceřadá nebo s kuželovou dírou.



Obrázek 4.8: Konstrukční varianty kroužků válečkových ložisek [13].

Kuželíková ložiska dokáží přenášet velká radiální i axiální zatížení, velikost axiální únosnosti je závislá na stykovém úhlu. Čárový styk valivých těles poskytuje vysokou tuhost, způsobuje ale vyšší tření a vznik tepla, výsledkem jsou menší max. otáčky než u ložisek kuličkových s kosouhlým stykem. Stejně jako tato se i kuželíková ložiska montují do páru, či se sdružují do dvojic.

⁶ OS – obráběcí stroj.



a)

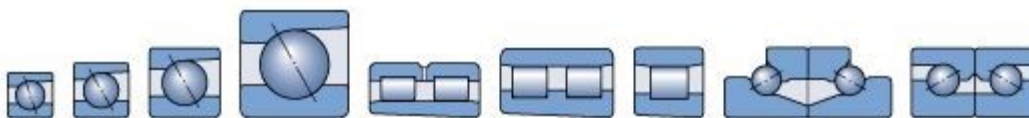
b)

Obrázek 4.9: Ukázka uložení ve valivých ložiscích

a) hřídel ve sdrúžených kuželíkových ložiscích do „X“

b) uložení vřetene v dvouřadém válečkovém ložisku s kuželovou dírou a třech kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem [13].

Stupeň přesnosti ložisek je dalším důležitým kritériem při jejich volbě. Při konstrukci vřeten je vhodné volit ložisko předního konce vysoce přesné, ložisko zadní postačuje standardních přesností. Přesná ložiska poskytují vyšší přípustné otáčky, menší vývin kmitů a tepla díky přesným geometrickým tvarům a vhodným materiálům. Tolerování ložisek stanovují příslušné normy a to v přesnosti chodu a geometrické přesnosti [12], [13].

**Obrázek 4.10:** Nabídka vysoce přesných ložisek firmy SKF [13].**Tabulka 4.1:** Standardní třídy přesnosti dle různých norem [13].

Přesnost chodu			Rozměrová přesnost		
ISO	ANSI/ABMA	DIN	ISO	ANSI/ABMA	DIN
2	ABEC 9	P2	2	ABEC 9	P2
4	ABEC 7	P4	4	ABEC 7	P4
5	ABEC 5	P5	5	ABEC 5	P5

Materiály ložisek jsou především legované konstrukční oceli s vhodným TZ nebo CH-TZ. Pro přesná ložiska se běžně používá kalená uhlíko-chromová ocel s obsahem cca. 1% uhlíku a 1,5 % chromu s tvrdostí 58 – 65 HRC. Další možností jsou různé modifikace korozivzdorných ocelí s vysokou chemickou čistotou, které zaručují vyšší únavovou odolnost, odolnost vůči kontaktnímu tlaku a tvrdost. Korozivzdorných ocelí se často užívá k výrobě kroužků v kombinaci s valivými tělesy z keramického materiálu [13].



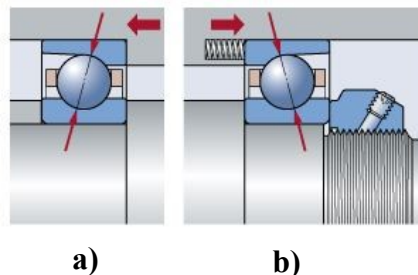
Tabulka 4.2: Porovnání ložiskových materiálů [13].

Vlastnosti materiálu	Nitrid křemíku	Ložisková ocel
Měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	3200	7900
Tvrdoost	1600 HV10	700 HV10
Modul pružnosti [GPa]	310	210
Tepelná roztažnost [$10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$]	3	12

Předpětí ložisek znamená, že na ložisko působí síla vyvolaná montážním uspořádáním. Provádí se z těchto důvodů:

- Zvýšení tuhosti
- Snížení hlučnosti – omezení vibrací
- Zvýšení přesnosti uložení

Pro uložení, u kterých se počítá s vysokými otáčkami, je důležitá stálá síla předpětí. Typicky se tak provádí pomocí lineárních pružin, které odtlačují vnější kroužek, přičemž vnitřní kroužek je na hřídeli bez vůle. Další možností vzájemné axiální posunutí kroužků, což poskytuje vyšší tuhost než uložení s pružinami. Existují ložiska, která mají nastavené předpětí již z výroby, pokud je to nutné, lze předpětí upravovat pomocí pokynů výrobce [13].



Obrázek 4.11: Nastavení předpětí v ložisku

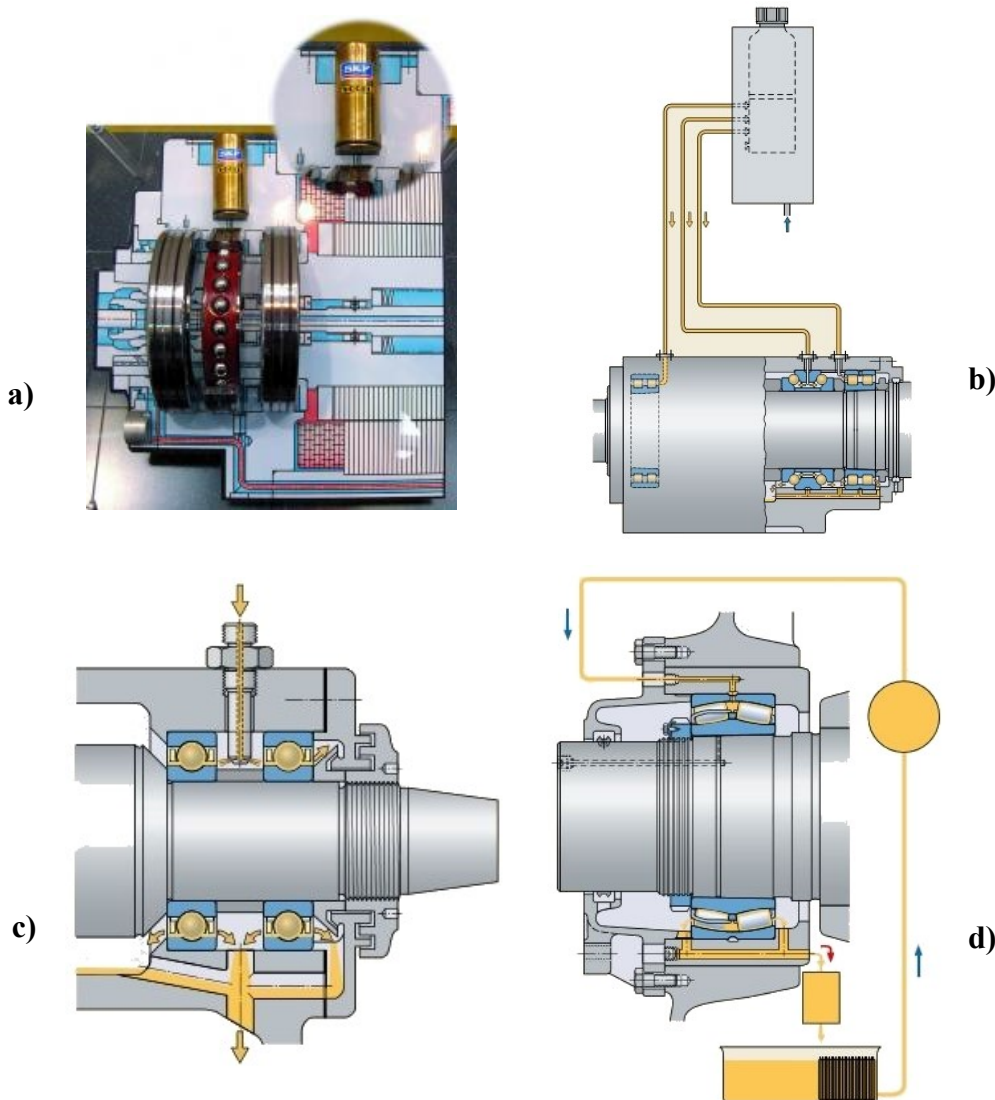
- a) vzájemným axiálním posunutím kroužků
- b) pomocí lineárních pružin [13].

Mazání valivých ložisek závisí na typu ložiska a dalších okolních podmínkách. Hlavním úkolem maziva v ložisku je zabránit styku kov na kov a chránit ho před korozí. Cirkulací maziva se také odvádí teplo. Důležitým aspektem při mazání je tloušťka vrstvy maziva. V závislosti na provozní teplotě, viskozitě maziva dalších vlivech může nastat:

- Mezní mazání – velmi tenká vrstva maziva k oddělení stykových ploch
- Hydrodynamické mazání – oddělení povrchů relativně tlustým mazacím filmem, nutná dodávka maziva
- Elastohydrodynamické mazání – mazivo je vtahováno mezi povrchy, které se po sobě odvalují.

Obecně nejpoužívanější je *mazání tukem*. Ten se skládá z 90 % z minerálního nebo ropného oleje a 10 % zahušťovadla. Různé typy ložisek potřebují rozdílné množství maziva. Gramáž udává u ložisek výrobce a také udává intervaly, po kterých je třeba ložisko domazávat.

Pro vysokootáčková vřetena je vhodné *mazání olejem* kvůli odvodu tepla. K mazání přesných vřetenových ložisek je třeba malé vrstvy oleje [4].



Obrázek 4.12: Možnosti mazání vřetenových ložisek

- systém domazávání tukem s elektrotermickým čerpadlem
- mazání olejovou mlhou
- mazání olejem s vysokotlakou tryskou
- mazání tlakovým oběhem oleje [33], [13].

4.3.2 Kluzná uložení

Kluzná ložiska dělíme na:

- hydrostatická
- hydrodynamická
- aerostatická
- aerodynamická.

Nosným médiem je kapalina (hydro), či vzduch (aero). Hydrodynamická a aerodynamická ložiska se mohou zatěžovat pouze po dosažení pracovních otáček, zatím co hydrostatická a aerostatická i za klidu. Ložiska se vzduchovým médiem najdou využití tam, kde jsou potřebná velmi vysoké otáčky, ložiska kapalinná poskytují vyšší tuhost s menšími maximálními otáčkami [9].



4.3.3 Elektromagnetická uložení

Neboli elektromagnetická, či magnetická aktivní ložiska mají hlavní výhodu v nulových mechanických pasivních odporech. Další výhodou je možnost aktivně ovládat uložení, čímž lze např. určovat hodnoty řezných sil. Existují ve variantách axiálních i radiálních. Princip radiálního ložiska je obdobný elektromotoru, avšak místo točivé momentu vytváří magnetickou sílu, která udržuje hřídel ve správné poloze. Tato ložiska jsou osazena snímači polohy, které poskytují zpětnou vazbu pro řídicí systém. Obsahují také běžná valivá ložiska, která zde fungují jako havarijní a slouží k bezporuchovému zastavení při výpadku proudu [9].

Klíčové vlastnosti:

- Maximální otáčky: $100\,000\text{ min}^{-1}$
- Široký výběr rozměrů
- Prakticky bezúdržbové



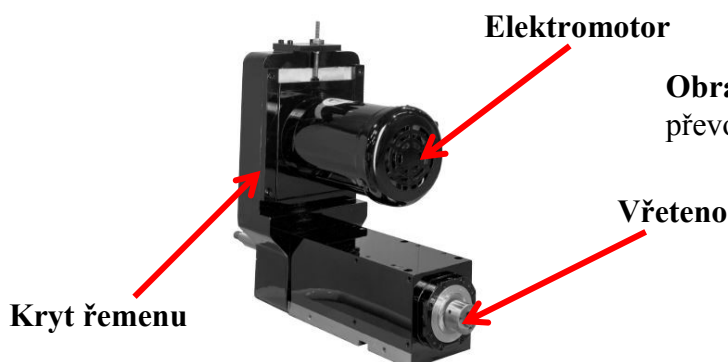
Obrázek 4.13: Vřeteno firmy SKF-S2M uložené v magnetických ložiscích [13].

4.4 Náhon vřetene

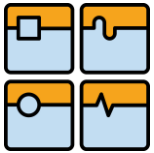
Pro přenos výkonu z elektromotoru na nástroj slouží různé typy mechanických převodů. Nyní bude provedeno základní rozdělení dle typu převodu.

4.4.1 Náhon řemenovým převodem

Využívají se především ozubené řemeny, lze se však setkat i s plochými řemeny. V případě plochých řemenů je nutno počítat s možným prokluzem. Ozubenými řemeny lze přenášet velké výkony bez prokluzu. Účinnost tohoto převodu je okolo 95% a lze a dosažitelné otáčky jsou až 15000 min^{-1} . Řemeny lze používat pro převod na delší vzdálenosti, což může být při určitých podmínkách požadováno. Nevýhodou ozubených řemenů je jejich cena a buzení vibrační při záběru zubů [14]. Jak ploché, tak ozubené řemeny je třeba po čase vyměnit [15].

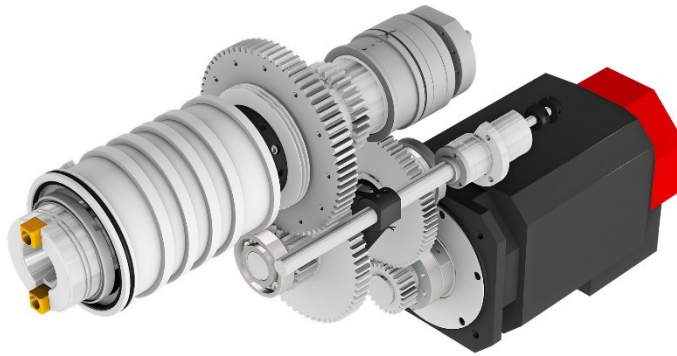


Obrázek 4.14: Vřeteno s řemenovým převodem značky Setco [34].



4.4.2 Náhon ozubeným převodem

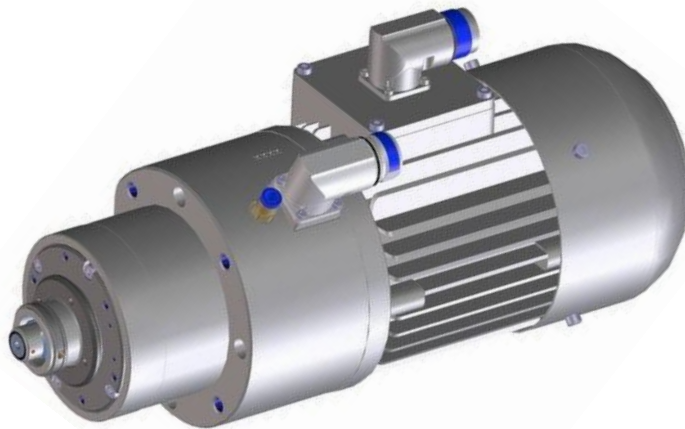
Pokud jsou soukolí vybavena mechanickým řazením, lze je s výhodou použít pro regulaci otáček nástroje. Vliv na otáčky má také výběr vhodného ozubeného soukolí (čelní, kuželové, šnekové) a počtu stupňů. Dle stupně přesnosti mohou ozubená kola přenášet velké točivé momenty i vysoké otáčky, ale z důvodu vzniku tepla nejsou vhodná pro vysokorychlostní obrábění. Obzvláště vhodná jsou pro přenos velkých momentů při nižších otáčkách, tudíž pro velké hrubovací stroje [15].



Obrázek 4.15: Vřeteno vertikálního OC Hyundai Wia [35].

4.4.3 Přímý náhon

V tomto případě je elektromotor v ose s vřetenem a je spojen mechanickou, či jinou spojkou. Výhodou je menší zástavbový prostor proti jiným převodům a možnost relativně jednoduše vyměnit motor proti elektrovřetenům. Účinnost přenosu energie z motoru se blíží 100%. Používá se v oblasti HSM díky dynamické stabilitě a nižšímu požadavku na točivý moment. Díky absenci mechanických převodů vykazuje přímý náhon malé vibrace a umožňuje dosahovat dobré struktury povrchu obrobku [15].

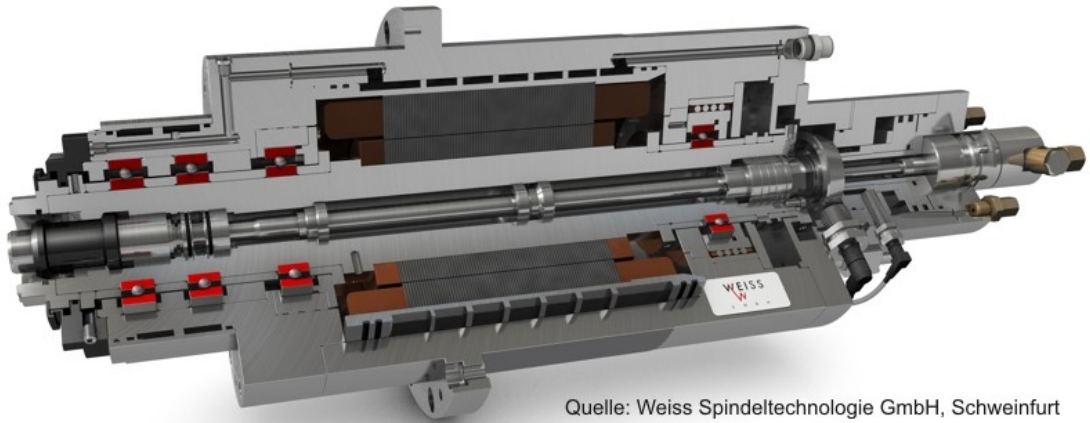


Obrázek 4.16: Vřeteno Fischer Spindle [36].



4.4.4 Elektrovřetena

Elektromotor je u nich součástí tělesa vřetene, rotor je lisován na hřídel vřetene nebo je její součástí. Stator je uložen ve skříni, či tubusu spolu s kapalinovým chlazením. Chlazení je nutné především, kvůli teplu z motoru, které se přenáší do samotného vřetene. Vibrace jsou minimální, maximální otáčky dosahující 50000 min^{-1} a více. Je nutná vysoká výrobní přesnost všech komponent a osazení senzory k měření teploty. Vysoká přesnost a osazení příslušenství se promítá do pořizovací ceny, která je velmi vysoká [15].



Quelle: Weiss Spindeltechnologie GmbH, Schweinfurt

Obrázek 4.17: Elektrovřeteno Weiss [37].

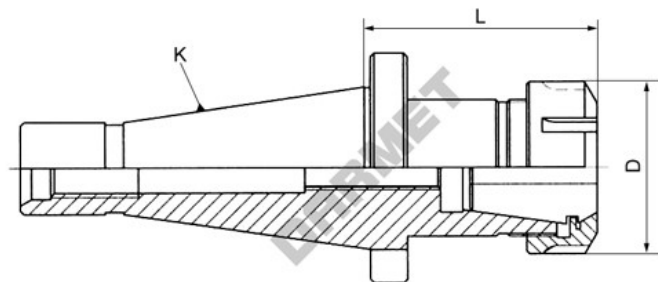
4.5 Upínání nástrojů

U OS na nerotační součásti je upínán nástroj do nástrojového držáku, který se upne do dutiny vřetene. Podle dutiny rozlišujeme tyto držáky:

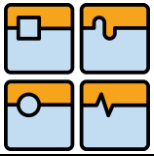
- ISO s kuželovou stopkou – kuželovitost 7:24
- HSK s krátkou kuželovou stopkou – kuželovitost 1:10
- Válcová stopka – spíše u konvenčních strojů
- Sandvik Coromant Capto – s speciální profil
- BIG Plus – obdoba ISO kuželu [4].



© www.upinacinaradi.eu



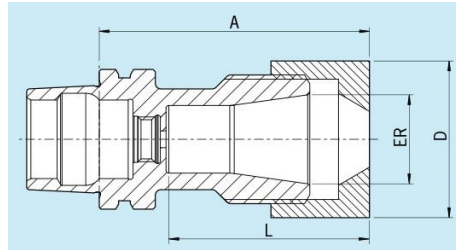
Obrázek 4.18: Držák pro upínání stopkových fréz ISO 40 [37].



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



a)



b)



c)



d)

Obrázek 4.19: Nástrojové držáky

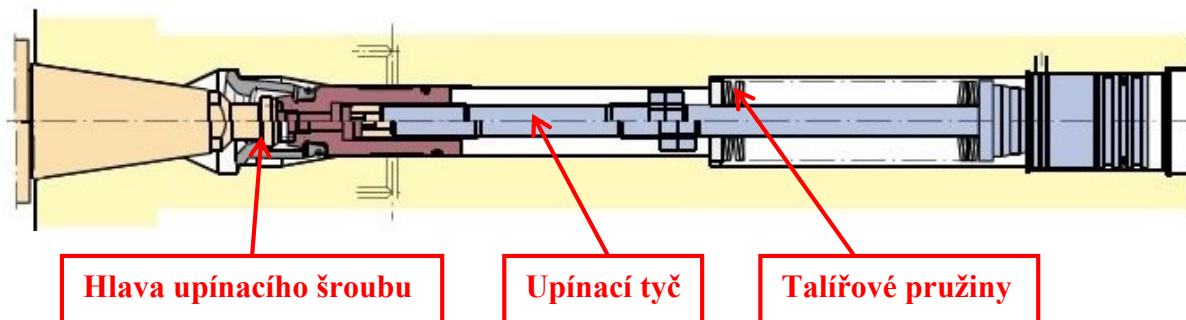
- a) držák typu HSK-A pro frézy s válcovou stopkou [39]
- b) profil držáku HSK-A [40]
- c) frézovací trn HSK-F pro čelní frézy [38]
- d) tvar držáku Coromant Capto [38].

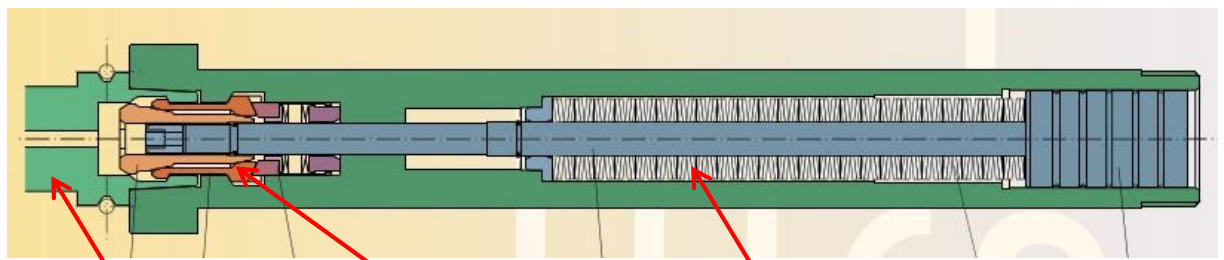
Současné CNC stroje bývají vybaveny upínacími systémy pro automatickou výměnu nástrojů. Nejznámějším výrobcem je německá firma OTT Jakob.

ISO stopka při upnutí nedosedá na čelo vřetene a je upínána za vnější stranu. Samotné upnutí je provedeno svazkem talířových pružin přes kuličky, které vtahují držák nástroje do vřetene uchycením za hlavu upínacího šroubu.

HSK stopka při upnutí dosedá na čelo vřetena a její hlavní výhodou je upnutí z vnitřní strany, což způsobuje, že při vyšších otáčkách je upnutí pevnější. Upnutí je realizováno táhly pomocí předepjatých talířových pružin.

V obou případech je uvolnění držáku provedeno hydraulickým válcem, který stlačí talířové pružiny a táhla uvolní držák. Tento válec může být vestavěný s upínací tyčí nebo jako nastavné zařízení, tzv. uvolňovací jednotka. Musí být umožněn přívod hydraulického oleje, řezné kapaliny a vzduchu čistícího vnitřní kužel. Upínací kleštiny jsou vybaveny mechanickým násobičem síly, který umocňuje upínací sílu pružin.

**Obrázek 4.20:** Upnutí držáku nástrojů ISO upínačem OTT Jakob [41].

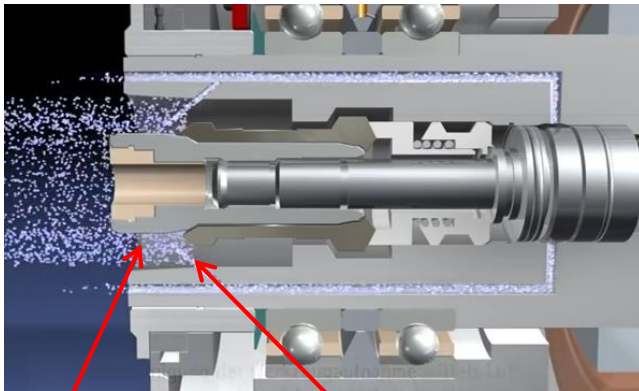


Držák nástrojů

Upínací kleštiny

Talířové pružiny

Obrázek 4.21: Upnutí držáku nástrojů HSK-E upínačem OTT Jakob [41].

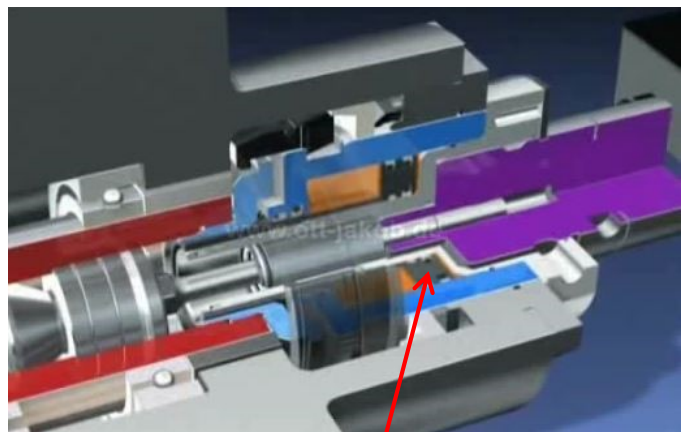


Upínací kužel

Proud vzduchu

Obrázek 4.22: Čištění upínacího kužele tlakem vzduchu [42].

Obrázek 4.23: Uvolňovací jednotka [41].



Hydraulický píst



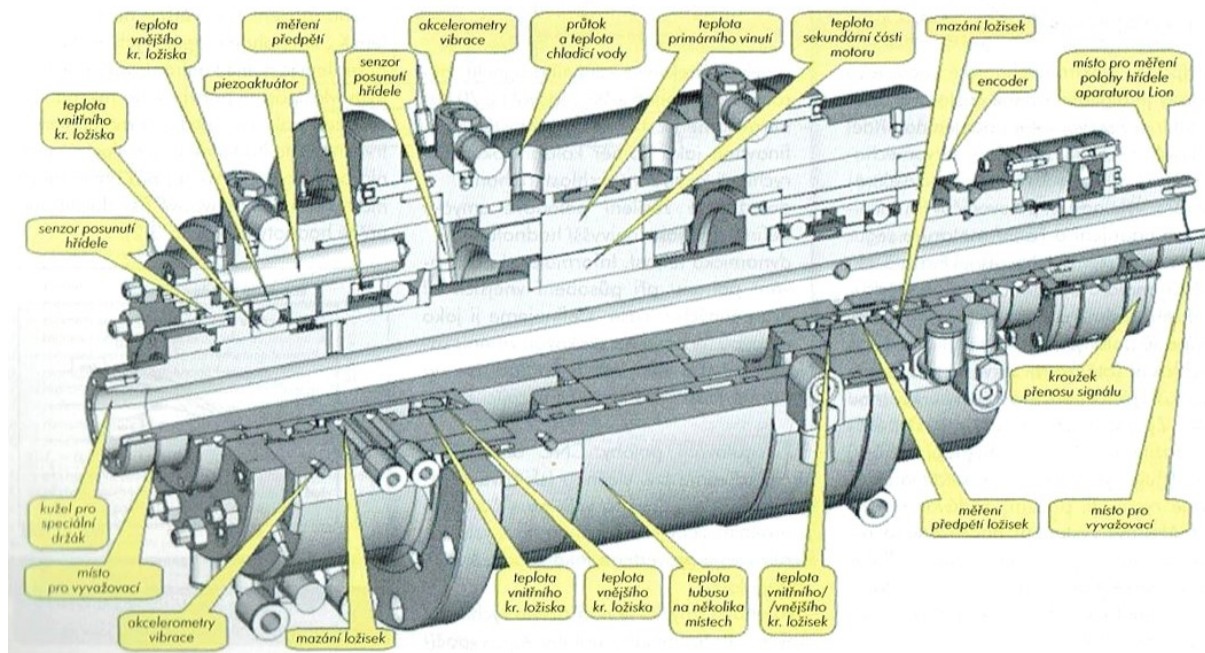
4.6 Příslušenství vřeten

Příslušenstvím jsou myšleny hlavně senzory všeho druhu, drobné součásti zajišťující přísun maziva, chladiva a čistícího vzduchu a přívody elektrické energie. Především elektrovřetena je nutné vzhledem k frekvenci otáčení a konstrukční složitosti monitorovat.

Existuje celá řada senzorů, například:

- Teplotní senzory
- Senzory vibrací
- Senzory deformací
- Senzory cizích předmětů
- Snímače otáček.

Fungují na principu magnetismu, elektrického odporu nebo např. senzory vyhodnocující tepelnou roztažnost vřeten na bázi vířivých proudů [16]. Na obrázku 4.24 jsou vyobrazeny možnosti diagnostiky vřetene s umístěnými senzory.



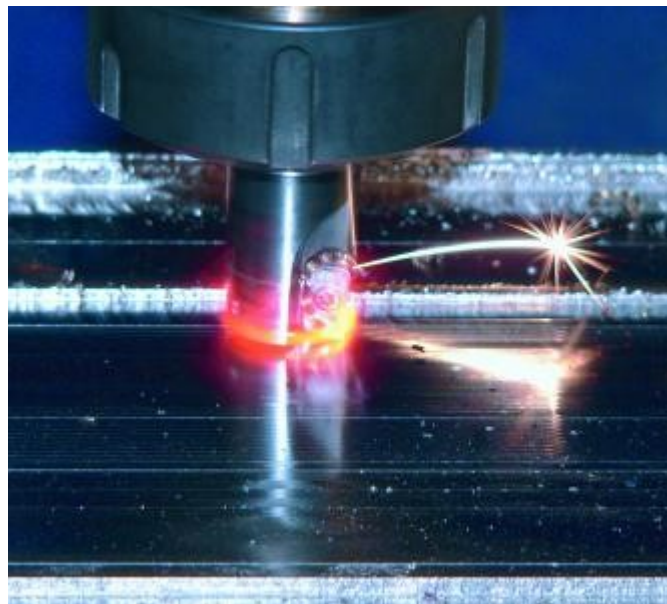
Obrázek 4.24: Diagnostika vřetene [4].



5 Návrh konstrukce vřetene

5.1 Výběr technologie frézování

Návrh konstrukce bude proveden pro vřeteno stroje k vysokorychlostnímu obrábění. Vysokorychlostní obrábění, dále HSM (High Speed Machining)⁷ je moderní metodou obrábění, jejíž teoretické podklady sahají až do roku 1930. Podstatou je využití vysokých řezných rychlostí, což při volbě správného stroje, nástroje a řezných podmínek zajišťuje lepší strukturu povrchu obrobku, než při běžném obrábění. Odlišný od konvenčního obrábění je také mechanismus tvoření třísky. Při použití vyšších posuvových rychlostí lze dosáhnout vysoké produktivity práce. HSM bývá dokončovací operací, jelikož kvůli dostatečně jemné struktuře povrchu lze vynechat konečné broušení.

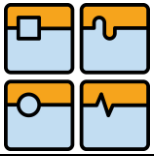


Obrázek 5.1: Ukázka suchého frézování slitiny titanu [45].

Pro frézování se nejčastěji používají monolitické čelní stopkové frézy z HSS, či slinutých karbidů. Vzhledem k parametrům kvality obrobku žádaných po HSM je nutno zachovat vysoké požadavky i na strojní vybavení. Stroje pro HSM jsou v drtivé většině případů vybaveny elektrovřeteny. Ta zajišťují minimální vibrace přenášející se do nástroje a to díky poloze motoru v ose nástroje a absenci mechanického převodu. Vhodné elektromotory dosahují vysokých otáček a jsou uzpůsobeny ke kapalinnému chlazení již od výrobce.

Této metody lze s výhodou užít při *obrábění hliníkových dílů*, kde lze zařadit vyšší posuvové rychlosti a tím odebrat větší objem materiálu za jednotku času, dále při *obrábění licích forem a zápusťek z nástrojové oceli*, kde je výhodou velmi dobrá struktura povrchu a v neposlední řadě lze obrábět i kalené materiály.

⁷ Často zmiňovaný je také pojem HSC – High speed cutting.



5.2 Volba vstupních parametrů

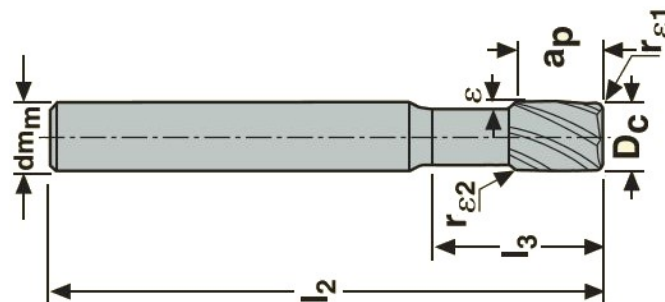
Při určení řezných podmínek a dalších parametrů vycházíme z využití frézovacího stroje. Primárním účelem stroje je výroba malých a středních trvalých licích forem – kokil technologií HSM. Vřeteno bude přizpůsobeno také k běžnému čelnímu frézování, což přispívá k univerzálnosti stroje.

Výchozím materiálem obráběných litých forem je zušlechtěná nástrojová ocel, označení dle ČSN 19 520. Jako nástroj slouží monolitická fréza s válcovou stopkou ze slinutých karbidů od firmy Seco. S ohledem na materiál obrobku byly z katalogu nástrojů Seco vybrány, či vhodně zvoleny tyto parametry:

Tabulka 5.1: Parametry stopkové frézy Seco Tornado JH130 [17].

Průměr nástroje	$D_{c1} = 10 \text{ mm}$
Počet zubů	$z_{c1} = 6$
Řezná rychlost	$v_{c1} = 180 \text{ až } 325 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Posuv na zub	$f_{z1} = 0,13 \text{ mm/zub}$
Šířka záběru ostří	$a_{p1} = 0,4 \text{ mm}$
Šířka řezu	$a_{e1} = 20 \text{ mm}$

Obrázek 5.2: Stopková fréza Seco Tornado JH130 [17].



Vedlejší pracovní náplní stroje je čelní hrubovací frézování nástrojové oceli. K tomuto účelu byla zvolena rovinná fréza s válcovou stopkou Walter Mini-KW F 2233.

Tabulka 5.2: Parametry rovinné frézy Walter Mini-KW F 2233 [18].

Průměr nástroje	$D_{c2} = 32 \text{ mm}$
Délka vyložení upnutého nástroje	$l_n = 130 \text{ mm}$
Počet zubů	$z_{c2} = 4$
Řezná rychlost	$v_{c2} = 325 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Posuv na zub	$f_{z2} = 0,15 \text{ mm/zub}$
Šířka záběru ostří	$a_{p2} = 5 \text{ mm}$
Šířka řezu	$a_{e2} = 32 \text{ mm}$
Specifická řezná síla pro 1 mm² třísky	$k_{c1.1} = 2500 \text{ MPa}$
Hodnota nárůstu	$m_c = 0,25$



Obrázek 5.3: Rovinná fréza Walter Mini-KW F 2233 [18].



5.3 Určení otáček vřetene

Výpočet je proveden pro tzv. nominální otáčky neboli otáčky, při kterých stroj pracuje většinu pracovní doby. Byla použita nejvyšší řezná rychlost z daného rozsahu, což způsobuje nejvyšší zatížení vřetene a při návrhu bude tedy dosaženo nejvyšší bezpečnosti.

$$n_n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} = \frac{325 \cdot 1000}{\pi \cdot 10} = 10345,07 \text{ min}^{-1}, [17] \quad (5.1)$$

Při obrábění licích forem jsou často využívány frézy menší než 10 mm či tzv. rádiusové frézy. Pro zachování doporučených řezných rychlostí okolo $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (volíme $325 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) i pro tyto nástroje vypočteme příslušné otáčky a bereme je v úvahu při návrhu vřetene.

Tabulka 5.3: Otáčky vřetene pro různé nástroje.

Průměr nástroje [mm]	Otáčky vřetene [min^{-1}]
10	10345,07
8	12931,34
6	17241,79

5.4 Výpočet kroutícího momentu a řezných sil

5.4.1 Maximální kroutící moment

Při návrhu je cílem určit maximální kroutící moment, na který je poté stroj dimenzován. Maximum kroutícího momentu nastává při minimálních otáčkách, což lze snadno odvodit z následující rovnice:

$$M_K = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (5.2)$$

Pokud při neměnném výkonu zvyšujeme kroutící moment, otáčky stroje musí zákonitě klesat. Z rovnice (5.1) vidíme, že nižších otáček dosáhneme při větších průměrech nástroje, je tedy logické, že k výpočtu maximálního kroutícího momentu použijeme největší možný nástroj a to rovinnou frézou o průměru 32 mm.

Střední tloušťka třísky

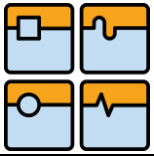
$$h_{m2} = f_{z2} \cdot \sqrt{\frac{a_{e2}}{D_{c2}}} = 0,15 \cdot \sqrt{\frac{32}{32}} = 0,15 [18] \quad (5.3)$$

Specifická řezná síla

$$k_{c2} = \frac{1 - 0,01 \cdot \gamma_0}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1.1} = \frac{1 - 0,01 \cdot 0}{0,15^{0,25}} \cdot 2500 = 4017,14 \text{ MPa} [18] \quad (5.4)$$

Řezná síla

$$F_{C2} = k_{c2} \cdot a_{p2} \cdot f_{z2} = 4017,14 \cdot 5 \cdot 0,15 = 3012,855 \text{ N} [18] \quad (5.5)$$

**Maximální kroučící moment**

$$M_{K_{\max}} = \frac{F_C \cdot D_{c2}}{2} = \frac{3012,855 \cdot 0,32}{2} = 48,2 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.6)$$

5.4.2 Kroučící moment při maximálních otáčkách

Vzhledem k momentovým charakteristikám elektromotorů je vhodné zjistit potřebný kroučící moment i při maximálních pracovních otáčkách. V tomto výpočtu to jsou otáčky pro stokovou frézu o průměru 6 mm.

Střední tloušťka třísky

$$h_{m1} = f_{z1} \cdot \sqrt{\frac{a_{e1}}{D_{c1}}} = 0,13 \cdot \sqrt{\frac{6}{6}} = 0,13 \text{ mm} \quad [18] \quad (5.7)$$

Specifická řezná síla

$$k_{c1} = \frac{1 - 0,01 \cdot \gamma_0}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1.1} = \frac{1 - 0,01 \cdot 0}{0,13^{0,25}} \cdot 2500 = 4163,46 \text{ MPa} \quad [18] \quad (5.8)$$

Řezná síla

$$F_{c1} = k_{c1} \cdot a_{p1} \cdot f_{z1} = 4163,46 \cdot 0,4 \cdot 0,13 = 216,5 \text{ N} \quad [18] \quad (5.9)$$

Kroučící moment

$$M_{K_{\min}} = \frac{F_{c1} \cdot D_{c\min}}{2} = \frac{216,5 \cdot 0,006}{2} = 0,65 \text{ N} \cdot \text{m} \quad [18] \quad (5.10)$$

5.4.3 Kroučící moment a řezná síla při ponorném frézování

Při ponorném frézování (posuv ve směru osy vřetene) vzniká axiální síla, která zatěžuje především ložiska. Tuto sílu je vhodné znát ke správnému výpočtu trvanlivosti ložisek.

Obráběným materiálem je i zde ocel 19 520 a nástrojem rovinná fréza Walter Mini-KW F 2233. Vzhledem k horší možnosti chlazení a mazání nástroje a jeho vyššímu zatížení, je voleno $f_{zp} = 0,01 \text{ mm/zub}$.

Síla při posuvu v záběru

$$F_f = 0,63 \cdot \frac{f_{zp} \cdot z \cdot D_{c2} \cdot k_{c1.1}}{2 \cdot (f_{zp} \cdot \sin(\kappa))^{m_c}} = 0,63 \cdot \frac{0,01 \cdot 4 \cdot 32 \cdot 2500}{2 \cdot (0,01 \cdot \sin(90))^{0,25}} = 3187,6 \text{ N}$$

Kroučící moment

$$M_{K_{p}} = \frac{D_{c2}^2 \cdot f_{zp} \cdot z \cdot k_{c1.1}}{8000 \cdot (f_{zp} \cdot \sin(\kappa))^{m_c}} = \frac{32^2 \cdot 0,01 \cdot 4 \cdot 2500}{8000 \cdot 0,01^{0,25}} = 40,5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad [18] \quad (5.10)$$



5.5 Výpočet potřebného výkonu motoru

Výkon bude vypočten opět pro frézu Walter o průměru 32 mm pro rovinné frézování.

Otáčky vřetene

Vypočteno pro řeznou rychlost $325 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a průměr nástroje 32 mm. Tyto otáčky jsou díky průměru nástroje podstatně menší než *nominální otáčky* vypočtené v kapitole 5.3.

$$n_{32} = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D_{c2}} = \frac{1000 \cdot 325}{\pi \cdot 32} = 3232,83 \text{ min}^{-1} \quad [18] \quad (5.7)$$

Posuvová rychlost

$$v_f = f_{z2} \cdot z_{c2} \cdot n_{32} = 0,15 \cdot 7 \cdot 3232,83 = 1939,7 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1} \quad [18] \quad (5.8)$$

Potřebný výkon motoru

$$P = \frac{a_{p2} \cdot a_{e2} \cdot v_f \cdot k_{c2}}{6 \cdot 10^7} = \frac{5 \cdot 32 \cdot 1939,7 \cdot 4017,14}{6 \cdot 10^7} = 20,78 \text{ kW} \quad [18] \quad (5.9)$$

5.6 Výběr elektromotoru

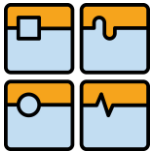
Motor musí splňovat vypočtené parametry uspořádané v tabulce 5.4:

Tabulka 5.4: Parametry pro volbu motoru.

Maximální pracovní otáčky	$n_{pmax} = 17241,79 \text{ min}^{-1}$
Nominální otáčky	$n_n = 10345,07 \text{ min}^{-1}$
Maximální kroutící moment	$M_{Kmax} = 48,2 \text{ N}\cdot\text{m}$ (při $n = 3232,83 \text{ min}^{-1}$)
Kroutící moment při max. otáčkách	$M_{Kmin} = 0,65 \text{ N}\cdot\text{m}$
Kroutící moment při nominálních otáčkách	$M_{Kn} = 1,1 \text{ N}\cdot\text{m}$
Potřebný výkon	$P = 20,78 \text{ kW}$ (při $n = 3232,83 \text{ min}^{-1}$)

kde nominálními otáčkami jsou myšleny otáčky, při kterých stroj pracuje nejčastěji (frézování nástrojové oceli stopkovou frézou o průměru 10 mm).

Jedním z hlavních výrobců motorů pro elektrovřetena je firma Siemens. Tato firma má v nabídce dvě základní řady bezrámových vestavěných motorů pro vřetena. Synchronní motory řady 1FE1 a asynchronní motory 1PH2.

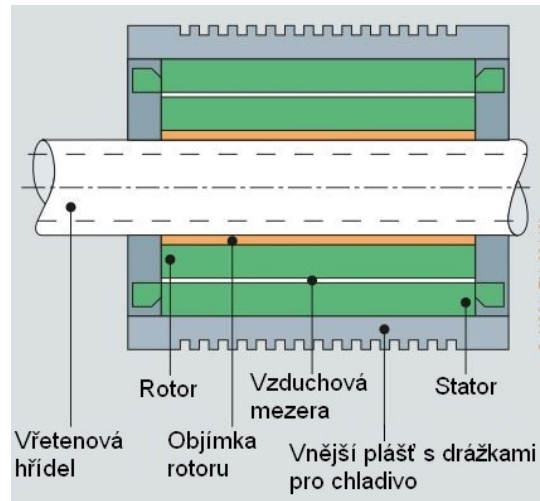


Pro navrhované vřeteno byl zvolen synchronní motor Siemens řady 1FE1, především kvůli těmto výhodám oproti asynchronnímu motoru podobné velikosti:

- vyšší krouticí moment
- dostatečně vysoké otáčky
- rychlejší rozběh
- méně odpadního tepla.



a)



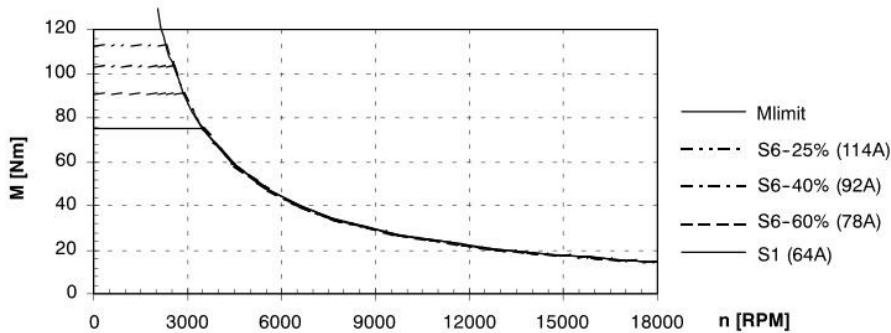
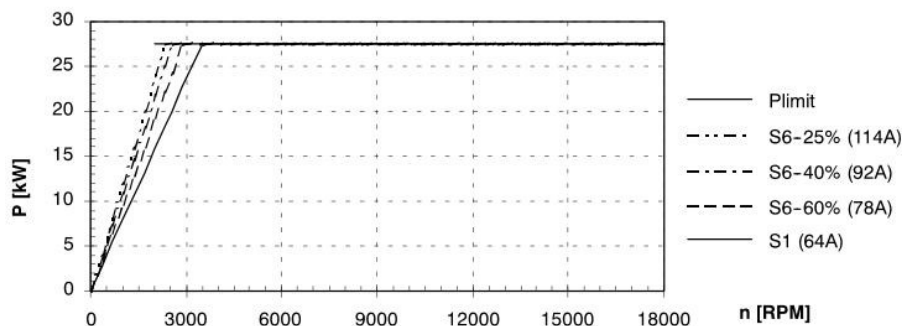
b)

Obrázek 5.4: Synchronní vestavěný („built-in“) motor Siemens řady 1FE1

- a) rotor a stator s přívodními kabely
b) schéma uložení motoru [43].

Tabulka 5.5: Parametry vybraného motoru.

Motor 1FE1093-4WM11	
Jmenovité otáčky	$n_N = 3500 \text{ min}^{-1}$
Maximální otáčky	$n_{\max} = 18000 \text{ min}^{-1}$
Maximální výkon	$P_{\max} = 28 \text{ kW}$
Jmenovitý krouticí moment	$M_N = 75 \text{ N}\cdot\text{m}$



Obrázek 5.5: Výkonová a momentová charakteristika motoru [44].

Z grafů charakteristik lze s dostatečnou přesností určit, že motor vyhovuje požadovaným parametrům, zejména výkonu 20,78 kW a momentu 48,2 N·m při otáčkách 3232,83 min⁻¹. Rozměry motoru jsou uvedeny v katalogu Siemens, který je součástí přílohy této práce.

5.7 Volba upínacího zařízení

Pro upínání nástrojů byl zvolen držák s kuželovou dutinou vřetene typu HSK-E. Tento typ držáku je vhodný pro automatickou výměnu nástrojů, dle firmy OTT-Jakob je též vhodný pro vysokootáčkové stroje. Kompletní systém upínání je od firmy OTT-Jakob, konkrétně velikosti E50, který dokáže přenést dostatečný moment. Schéma zařízení je na obrázku 4.21 v rešeršní části této práce. Pro uvolnění nástroje je zvolen hydraulický systém LE92, taktéž od firmy OTT-Jakob. O jeho konstrukci bude pojednáno v podkapitole 5.10.

Tabulka 5.6: Parametry upínacího zařízení OTT Jakob HSK-E50.

Maximální přenášený moment	56 N·m
Maximální dovolené otáčky	39367 min ⁻¹
Upínací síla	11000 N



5.8 Návrh vřetenových ložisek

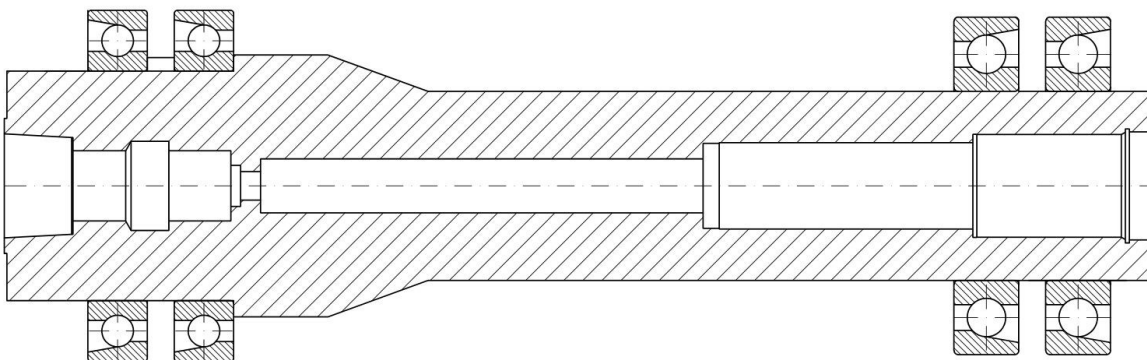
Předběžně byla vybrána ložiska z široké nabídky firmy SKF, konkrétně vysoce přesná kuličková ložiska s kosoúhlým stykem uspořádaná ve dvojicích do tandemu v přední i zadní části vřetene, vhodná pro uložení vřeten obráběcích strojů. Rozměr ložisek byl volen s ohledem na průměr hřídele, který byl navržen dle velikosti rotoru a jeho vložky. Dalším aspektem při volbě

Tabulka 5.7: Parametry předního vřetenového ložiska.

Vysoce přesné kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem SKF 7017 CD/HCP4AL (přední - B)	
Maximální otáčky (mazání tukem)	12000 min ⁻¹
Maximální otáčky (mazání olejovou mlhou)	19000 min ⁻¹
Dynamická únosnost	C _B = 67,6 kN
Statická únosnost	C _{0B} = 65,5 kN
Vnější průměr	D _B = 130 mm
Vnitřní průměr	d _B = 85 mm
Šířka	B _B = 22 mm
Radiální tuhost ložiska	k _{rB} = 320 N·μm ⁻¹

Tabulka 5.8: Parametry zadního vřetenového ložiska.

Vysoce přesné kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem SKF 7214 CD/HCP4A (zadní - A)	
Maximální otáčky (mazání tukem)	14000 min ⁻¹
Maximální otáčky (mazání olejovou mlhou)	12000 min ⁻¹
Dynamická únosnost	C _A = 68,9 kN
Statická únosnost	C _{0A} = 58,5 kN
Vnější průměr	D _A = 125 mm
Vnitřní průměr	d _A = 70 mm
Šířka	B _A = 24 mm
Radiální tuhost ložiska	k _{rA} = 320 N·μm ⁻¹



Obrázek 5.6: Schéma uložení ložisek do tandemu na prvotním návrhu hřídele.



5.8.1 Výpočet ideální vzdálenosti ložisek

Byl proveden v softwaru Mathcad 14 dle vztahů (4.8) až (4.16) uvedených v rešeršní části. Vycházíme ze základních rozměrů hřídele a předběžného umístění ložisek. Význam veličin je vysvětlen na další straně.

Parametry k výpočtu

$$a = 43,5 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$D_2 = 85 \text{ mm}$$

$$d_2 = 26 \text{ mm}$$

$$D_1 = 70 \text{ mm}$$

$$d_1 = 38 \text{ mm}$$

$$k_{r1} = 300 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

$$k_{r2} = 320 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

Kvadratický moment průřezu části vřetene mezi ložisky

$$J_1 = \frac{\pi \cdot (D_1^4 - d_1^4)}{64} \quad J_1 = 1,076 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Kvadratický moment průřezu převlé části vřetene

$$J_2 = \frac{\pi \cdot (D_2^4 - d_2^4)}{64} \quad J_2 = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Poddajnost zadního ložiska

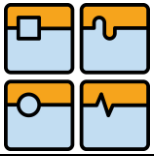
$$C_1 = \frac{1}{k_{r1}} \quad C_1 = 3,333 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1}$$

Poddajnost předního ložiska

$$C_2 = \frac{1}{k_{r2}} \quad C_2 = 3,125 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1}$$

Koeficienty kubické rovnice

$$q = \frac{-6 \cdot E \cdot J_1 \cdot C_2}{a} \quad r = -6 \cdot E \cdot J_1 \cdot (C_2 + C_1)$$

**Kořen rovnice**

$$z = \frac{r^2}{4} + \frac{q^3}{27}$$

$$u = \sqrt[3]{\frac{-r}{2} + \sqrt{z}}$$

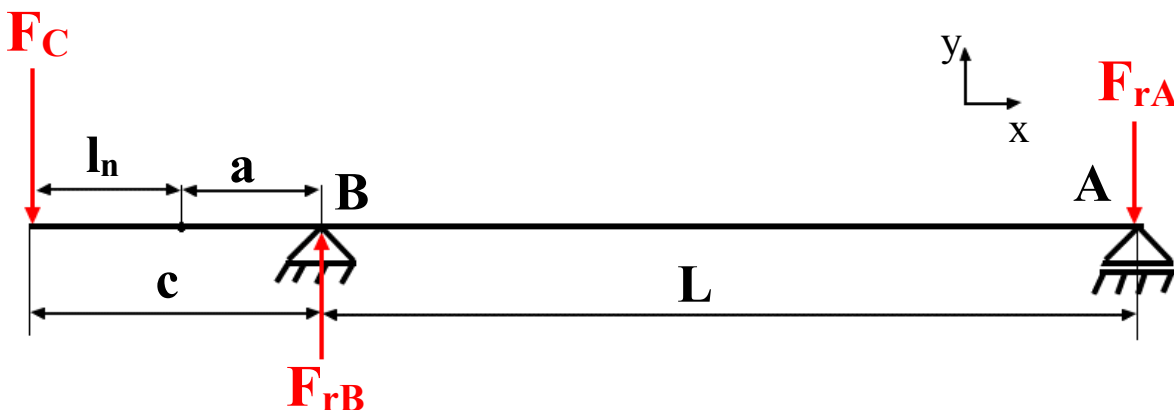
$$v = \sqrt[3]{\frac{-r}{2} - \sqrt{z}}$$

$$x_1 = u + v = 0,35 \text{ m}$$

Výsledek $x_1 = 0,35 \text{ m}$ znamená, že vzhledem k celkové minimální deformaci je vhodná vzdálenost mezi ložisky $0,35 \text{ m}$, která je i konstrukčně vyhovující

5.8.2 Výpočet silových reakcí v ložiscích

Pro výpočet trvanlivosti ložisek je nutné znát silové reakce vznikající v ložiscích vlivem zatížení – řezné síly, předpětí atd. Tyto reakce lze zjistit řešením statických rovnic rovnováhy pro staticky určitě uložený náhradní nosník.



Obrázek 5.7: Schéma náhradního nosníku pro vřeteno při čelním frézování.
 L_n – vyložení nástroje s držákem.

V tabulce 5.9 jsou uspořádány údaje potřebné k výpočtu silových reakcí při hrubování i při frézování forem metodou HSM.

Tabulka 5.9: Parametry pro výpočty reakcí ložisek.

Vzdálenost působišť reakcí ložisek	$L = 350 \text{ mm}$
Vzdálenost čela vřetene od předního ložiska	$a = 43,5 \text{ mm}$
Celkové vyložení nad předním ložiskem	$c = 173,5 \text{ mm}$
Vyložení nástroje s držákem	$l_n = 130 \text{ mm}$
Řezná síla při hrubování	$F_C = 3012,855 \text{ N}$
Řezná síla při HSM (frézování forem)	$F_{Ch} = 216,5 \text{ N}$

**Silové reakce pro hrubování**

Hrubování probíhá rovinnou frézou Walter a řezná síla je zde nejvyšší z uvažovaných způsobů frézování, tento případ je tedy vhodný pro kontrolu trvanlivosti ložisek.

Rovnice statické rovnováhy

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{rB} - F_{rA} - F_C = 0; \quad F_{rA} = F_{rB} - F_C$$

$$\sum M_A = 0$$

$$-F_{rB} \cdot L + F_C \cdot (c + L) = 0$$

$$F_{rB} = \frac{F_C \cdot (L + l_n + a)}{L} = \frac{3012,855 \cdot (350 + 130 + 43,5)}{350} = 4506,37 \text{ N}$$

$$F_{rA} = 4506,37 - 3012,855 = 1493,52 \text{ N}$$

Silové reakce pro HSM

Budou vypočteny pro stejný náhradní nosník a řeznou silou odpovídající HSM, viz tabulka 5.9.

Rovnice statické rovnováhy

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{rBh} - F_{rAh} - F_{Ch} = 0; \quad F_{rAh} = F_{rBh} - F_{Ch}$$

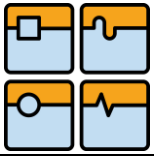
$$\sum M_A = 0$$

$$-F_{rBh} \cdot L + F_{Ch} \cdot (c + L) = 0$$

$$F_{rBh} = \frac{F_{Ch} \cdot (L + l_n + a)}{L} = \frac{216,5 \cdot (350 + 130 + 43,5)}{350} = 323,82 \text{ N}$$

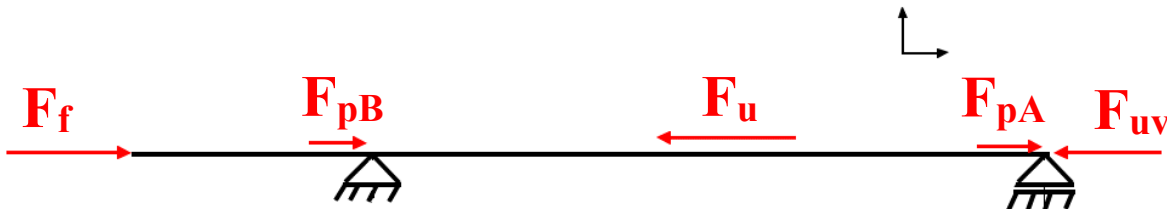
$$F_{rAh} = 323,82 - 216,5 = 107,32 \text{ N}$$

Vidíme, že silové namáhání ložisek je v případě HSM řádově menší, vysoké otáčky nástroje však mohou být i při nízkých silách limitujícím faktorem v trvanlivosti ložisek. Proto je dobré silové reakce znát a provést kontrolu trvanlivosti.



5.8.3 Axiální síly působící na ložiska

Axiální síly ve vřetenových ložiscích vznikají vlivem osových řezných sil a dalších montážních i pracovních procesů. Na obrázku 5.7 je schéma všech nezanedbatelných osových sil působících na ložiska vřetene. Všechny tyto síly nikdy nepůsobí ve stejný okamžik, každé zatížení odpovídá specifické pracovní náplni stroje.



Obrázek 5.8: Schéma axiálních sil působících na vřetenová ložiska.

F_f - posuvová síla při ponorném frézování

F_{pB} - síla předpětí předního ložiska

F_u - tíha součástí vřetene uložených v ložiscích

F_{pA} - síla předpětí zadního ložiska

F_{uv} - síla vyvozena hydraulickým uvolňovačem nástrojů.

Síly předpětí ložisek musí být vyvozeny správnou montáží a zajišťují vymezení vůle v ložiscích a tím zvýšení jejich tuhosti a přesnosti chodu. Dle katalogu SKF jsou síly předpětí:

$$F_{pA} = 520 \text{ N}$$

$$F_{pB} = 500 \text{ N}$$

Tyto síly jsou sníženy stálou tíhou uložených součástí, o kterou je nutno skutečné předpětí zvýšit. Skutečné síly předpětí tedy jsou:

$$F_{pAS} = F_{pA} + F_u = 520 + 196,13 = 716,13 \text{ N}$$

$$F_{pBS} = F_{pB} + F_u = 500 + 196,13 = 696,13 \text{ N}$$

Síla posuvová vzniká při tzv. ponorném frézování, což je obdoba vrtání do plného materiálu. Je to síla odporu materiálu vůči obrábění působící v ose nástroje.

Tíha uložených součástí působí na ložiska vertikálně umístěného vřetene neustále. Při hmotnosti těchto součástí $m_u = 20 \text{ kg}$ je tíha:

$$F_u = m_u \cdot g = 20 \cdot 9,81 = 196,13 \text{ N}$$

Síla hydraulického uvolňovače působí pouze při výměně nástrojů. Je to síla hydraulické kapaliny na plochu pístu, která musí být vyšší než síla talířových pružin držících nástroj.

**5.8.4 Kontrola trvanlivosti ložiska B (přední ložisko)**

Přední část vřetene je uložena do sady 2 tandemových ložisek. Jsou uspořádána tak, že zachycují axiální síly směřující do vřetene. Trvanlivost těchto ložisek bude ověřena pro 3 základní případy.

Tabulka 5.10: Hlavní parametry pro výpočet trvanlivosti.

Vysoce přesné kuličkové ložisko s kosouhlým stykem SKF 7017 CD/HCP4AL (přední - B)	
Dynamická únosnost	$C_B = 67600 \text{ N}$
Statická únosnost	$C_{0B} = 65500 \text{ N}$
Součinitel únosnosti sady	$f_B = 1,62$
Součinitel ekvivalentního zatížení	$f_{0B} = 15,7 \text{ mm}$
Součinitel tvaru valivých těles	$a_B = 3$

Trvanlivost při kombinaci axiálního a radiálního zatížení

Pro výpočty jsou užity síly vypočtené zvlášť pro ponorné a čelní hrubovací frézování. V praxi jsou řezné síly při kombinovaném frézování menší, např. díky volbě vhodné trajektorie nástroje – kruhová interpolace. Relativně vysoké řezné síly vypočtené v kapitole 5.4 jsou užity z důvodu vyšší bezpečnosti návrhu.

Tabulka 5.11: Parametry procesu pro výpočet trvanlivosti.

Posuvná síla při ponorném frézování	$F_f = 3187,6 \text{ N}$
Hrubovací otáčky	$n_{32} = 3232,83 \text{ min}^{-1}$
Radiální reakční síla v ložisku B	$F_{rB} = 4506,37 \text{ N}$

Radiální zatížení

$$F_{rB} = 4506,37 \text{ N}$$

Axiální zatížení

Působí zde síla od ponorného frézování, skutečné předpětí ložisek i tíha uložených součástí.

$$F_{aB} = F_f + F_{pBS} - F_u = 3187,6 + 696,13 - 196,13 = 3687,6 \text{ N}$$

Dynamická únosnost páru ložisek

$$C_{Bs} = f_B \cdot C_B = 1,62 \cdot 67600 = 109512 \text{ N}$$

Ekvivalentní dynamické zatížení

Dle podmínky $\frac{f_{0B} \cdot F_{aB}}{C_{0B}} = \frac{15,7 \cdot 3687,6}{65500} = 0,8839$ jsou součinitele pro dané zatížení:



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

$$e_B = 0,46$$

$$X_{2B} = 0,44$$

$$Y_{2B} = 1,23$$

Dle podmínky $\frac{F_{aB}}{F_{rB}} = \frac{3687,6}{4506,37} = 0,818 \geq e_B$ platí:

$$P_B = X_{2B} \cdot F_{rB} + Y_{2B} \cdot F_{aB} = 0,44 \cdot 3187,6 + 1,23 \cdot 3687,6 = 6518,55 \text{ N}$$

Základní trvanlivost

$$L_{10B} = \left(\frac{C_{Bs}}{P_B} \right)^{a_B} \cdot \frac{10^6}{n_{32}} = \left(\frac{109512}{6518,55} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{3232,83} = 24445,44 \text{ h}$$

Základní trvanlivost předního ložiska při kombinaci čelního hrubování a ponorného frézování je 24445,44 hodin.

Trvanlivost při HSM (frézování forem)

Řezné síly jsou při čelním vysokorychlostním obrábění menší, což rapidně zvyšuje trvanlivost. Pracovní otáčky jsou však řádově nižší, což trvanlivost obecně snižuje.

Tabulka 5.12: Parametry procesu pro výpočet trvanlivosti.

Posuvná síla při ponorném frézování	$F_f = 3187,6 \text{ N}$
Nominální otáčky	$n_n = 10345,07 \text{ min}^{-1}$
Řezná síla při HSM (frézování forem)	$F_{Ch} = 216,5 \text{ N}$

Radiální zatížení

$$F_{rB} = 323,82 \text{ N}$$

Axiální zatížení

Působí zde skutečné předpětí ložisek a tíha uložených součástí.

$$F_{aB} = F_{pbS} - F_u = 3187,6 + 696,13 - 196,13 = 500 \text{ N}$$

Dynamická únosnost páru ložisek

$$C_{Bs} = f_B \cdot C_B = 1,62 \cdot 67600 = 109512 \text{ N}$$

Ekvivalentní dynamické zatížení

Dle podmínky $\frac{f_{0B} \cdot F_{aB}}{C_{0B}} = \frac{15,7 \cdot 500}{65500} = 0,12$ platí:

$$P_B = F_{rB} = 323,82 \text{ N}$$

Základní trvanlivost

$$L_{10B} = \left(\frac{C_{Bs}}{P_B} \right)^{a_B} \cdot \frac{10^6}{n_n} = \left(\frac{109512}{323,82} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{10345,07} = 62323309 \text{ h}$$

Základní trvanlivost ložiska při HSM je 62313309,9 hodin, pro tento účel je tedy ložisko značně předdimenzované.

Trvanlivost bez zatížení při maximálních otáčkách

Uvažujeme běh stroje, kdy nástroj není v záběru při maximálních pracovních otáčkách. Tyto otáčky náleží stopkové fríze o průměru 6 mm.

Tabulka 5.13: Parametry procesu pro výpočet trvanlivosti.

Tíha uložených součástí	$F_u = 196,13 \text{ N}$
Maximální pracovní otáčky	$n_{\max} = 17241,79 \text{ min}^{-1}$
Skutečné předpětí ložiska B	$F_{pBS} = 696,13 \text{ N}$

Radiální zatížení

Jelikož nástroj není v záběru, radiální zatížení je nulové.

Axiální zatížení

Působí zde skutečné předpětí ložisek a tíha uložených součástí.

$$F_{aB} = F_{pBS} - F_u = 3187,6 + 696,13 - 196,13 = 500 \text{ N}$$

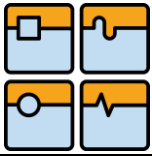
Dynamická únosnost páru ložisek

$$C_{Bs} = f_B \cdot C_B = 1,62 \cdot 67600 = 109512 \text{ N}$$

Ekvivalentní dynamické zatížení

Dle podmínky $\frac{f_{0B} \cdot F_{aB}}{C_{0B}} = \frac{15,7 \cdot 500}{65500} = 0,12$ platí:

$$P_B = Y_{2B} \cdot F_{aB} = 1,47 \cdot 500 = 735 \text{ N}$$

Základní trvanlivost

$$L_{10B} = \left(\frac{C_{Bs}}{P_B} \right)^{a_B} \cdot \frac{10^6}{n_{\max}} = \left(\frac{109512}{735} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{17241,79} = 3197345 \text{ h}$$

Základní trvanlivost ložiska při maximálních otáčkách je 3197345 hodin.

5.8.5 Kontrola trvanlivosti ložiska A (zadní ložisko)

Zadní část vřetene je uložena do sady 2 tandemových ložisek. Tato ložiska jsou v axiálním směru zatížena pouze tíhou uložených součástí a při výměně nástrojů silou od hydraulického uvolňovače. Trvanlivost bude ověřena pro 2 základní případy.

Tabulka 5.14: Hlavní parametry pro výpočet trvanlivosti.

Vysoce přesné kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem SKF 7214 CD/HCP4A (zadní - A)	
Dynamická únosnost	$C_A = 68900 \text{ N}$
Statická únosnost	$C_{0A} = 58500 \text{ N}$
Součinitel únosnosti sady	$f_A = 1,62$
Součinitel ekvivalentního zatížení	$f_{0A} = 14,8$
Součinitel tvaru valivých těles	$a_B = 3$

Trvanlivost při čelním hrubování

Jelikož ložiska v podpoře A nezachycují osové síly z řezného procesu, počítáme zde pouze s čelním hrubováním, které vyvozuje radiální silové reakce.

Tabulka 5.15: Parametry procesu pro výpočet trvanlivosti.

Skutečné předpětí ložiska B	$F_{pAS} = 713,13 \text{ N}$
Hrubovací otáčky	$n_{32} = 3232,83 \text{ min}^{-1}$
Radiální reakční síla v ložisku A	$F_{rA} = 1493,52 \text{ N}$

Radiální zatížení

$$F_{rA} = 1493,52 \text{ N}$$

Axiální zatížení

Působí zde skutečné předpětí ložisek a tíha uložených součástí.

$$F_{aA} = F_f + F_{pAS} - F_u = 716,13 - 196,13 = 520 \text{ N}$$

Dynamická únosnost páru ložisek

$$C_{As} = f_A \cdot C_A = 1,62 \cdot 68900 = 109512 \text{ N}$$

Ekvivalentní dynamické zatížení

Dle podmínky $\frac{f_{0A} \cdot F_{aA}}{C_{0A}} = \frac{15,7 \cdot 520}{65500} = 0,131$ platí:

$$P_A = F_{rA} = 1493,52 \text{ N}$$

Základní trvanlivost

$$L_{10A} = \left(\frac{C_{As}}{P_A} \right)^{a_A} \cdot \frac{10^6}{n_{32}} = \left(\frac{111618}{1493,52} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{3232,83} = 2032460,044 \text{ h}$$

Základní trvanlivost zadního ložiska při čelním hrubování je 24445,44 hodin.

Bezpečnost proti poškození při uvolnění nástroje

Uvolnění nástroje zde probíhá pomocí hydraulického válce, který silou F_{uv} přetlačí talířové pružiny upínacího mechanismu OTT- Jakob. Tato síla je přenášena na zadní ložisko a její velikosti jsou v řádech jednotek či desítek kN, tudíž je vhodné zkontrolovat statickou pevnost ložiska.

Statická únosnost páru ložisek

$$C_{0As} = f_A \cdot C_{0A} = 1,62 \cdot 58500 = 94770 \text{ N}$$

Síla při uvolnění

Z katalogu firmy OTT–Jakob byly k hydraulickému uvolňovači LE92 nalezeny tyto údaje:

$$p_{uv} = 16 \text{ MPa} \quad - \text{ tlak kapaliny při uvolnění nástroje}$$

$$S_{uv} = 16,5 \text{ cm}^2 \quad - \text{ plocha pístu}$$

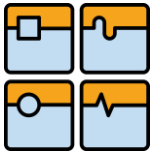
Sílu lze vypočítat ze známého vztahu:

$$F_{uv} = p_{uv} \cdot S_{uv} = 16 \cdot 1650 = 26400 \text{ N}$$

Ekvivalentní statické zatížení

Skládá se ze síly od uvolňovače, tíhy uložených součástí a předpětí ložiska.

$$P_{0A} = F_{uv} + F_u - F_{pAS} = 26400 + 196,13 - 716,13 = 24080 \text{ N}$$



Statická bezpečnost ložisek

Dle firmy SKF nebude ložisko poškozeno statickým namáháním, pokud platí vztah.

$$C_{0,As} \geq P_{0,A} \cdot s_{0,A}$$

kde s_{0A} je bezpečnost proti statickému poškození, dle SKF pro kuličková ložiska $s_{0A} = 2$.

$$94770 \geq 24080 \cdot 2 = 48160$$

Daný vztah platí, ložisko tedy vyhovuje statickému namáhání, navíc s vyšší než žádanou bezpečností.

5.8.6 Komentář k návrhu ložisek

Pro vřetenou byla vybrána přesná kuličková ložiska s kosoúhlým stykem od firmy SKF. V přední i zadní podpoře vřeteny jsou umístěna dvě ložiska do tandemu, takového uložení bylo voleno z důvodu zvýšené tuhosti a únosnosti.

Trvanlivost nejvíce zatíženého ložiska je okolo 24 000 hodin, což při plném pracovním zatížení 18 hodin denně (třisměnný provoz) a 5 dní v týdnu znamená trvanlivost cca. 5,5 roku. V praxi jsou klíčové ostatní aspekty jako vibrace stroje, čistota maziva či zodpovědný provoz stroje, které ovlivňují životnost zařízení i jeho částí.

5.9 Kontrola vřetenové hřídele

5.9.1 Výpočet průhybu a tuhosti

Tuhost, neboli odolnost proti deformaci je jedním z nejdůležitějších parametrů vřeten i celých obráběcích strojů. Pokud je tuhost vysoká, deformace součástí je malá a lze obrábět přesněji. Nejdůležitější je deformace na předním konci vřeteny, jelikož je v něm upnut nástroj a tedy nejvíce ovlivňuje jakost práce. K dosažení malé deformace přispívá např. ideální umístění ložisek, robustní konstrukce a malé vyložení konce vřeteny s nástrojem.

Deformace (průhyb) předního konce vřeteny

Z rovnice (4.7):

$$\delta_1 = \frac{F_C \cdot a^2}{3 \cdot E} \cdot \left(\frac{L}{J_1} + \frac{a}{J_2} \right) + \frac{F}{L^2} \cdot [a^2 \cdot C_A + (a+L)^2 \cdot C_B]$$

$$\delta_1 = 11,2 \mu\text{m}$$

Tuhost vřeteny na předním konci

$$k = \frac{F_C}{\delta_1} = \frac{3012,855}{15,2} = 198,21 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$



5.9.2 Kontrola hřídele vůči meznímu stavu pružnosti

Při řezném procesu frézování vznikají řezné síly proměnného charakteru působící především na nástroj a vřeteno stroje. Je tedy vhodné provést pevnostní kontrolu nosné části vřetene – vřetenové hřídele.

V hřídeli lze rozeznat tři druhy působící napětí

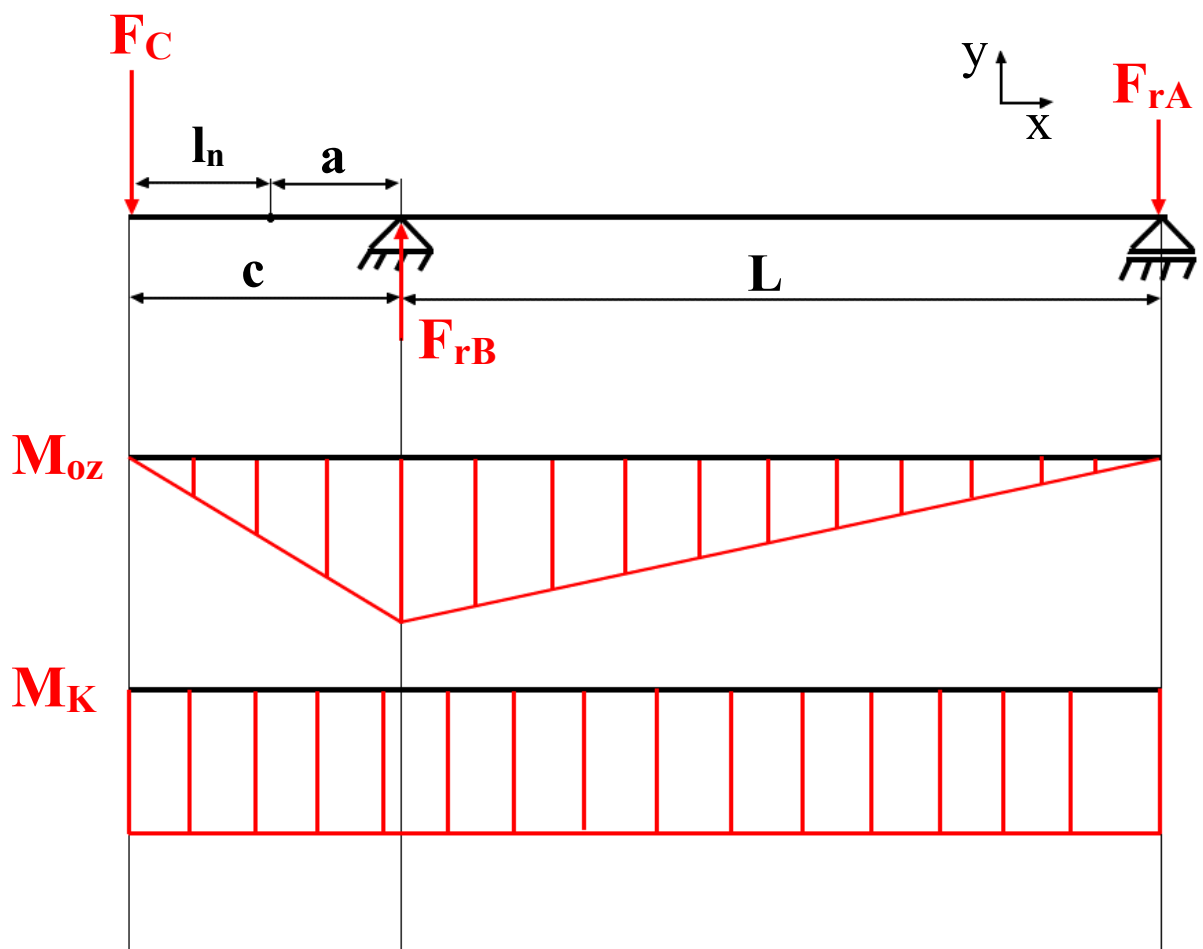
- napětí v ohybu – vlivem řezné síly
- napětí v krutu – vlivem řezné síly
- tlakové napětí – při odepnutí nástroje tlakem kapaliny.

Materiál hřídele byl volen dle :

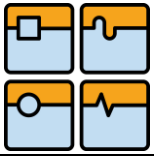
12 020 dle ČSN 41 2020 – uhlíková ocel k cementaci s parametry:

$$R_m = 500 \text{ MPa}$$

$$R_e = 300 \text{ MPa}$$



Obrázek 5.9: Schéma náhradního nosníku pro vřeteno a průběhu zátěžných momentů.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Napětí v ohybu

Vzniká vlivem ohybového momentu vlivem řezné síly, který je stejně jako ohybové napětí lineárně proměnný s délkou hřídel s maximem v silovém působišti přední sady ložisek. Pro výpočet užitíme maximální ohybový moment a průměry duté hřídele pod ložiskem B.

$$D_o = 85 \text{ mm}$$

$$d_o = 26 \text{ mm}$$

Maximální ohybový moment

$$M_{o_{\max}} = -F_C \cdot c = 3012,855 \cdot 173,5 = 522730,34 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Maximální ohybové napětí

$$\sigma_{o_{\max}} = \frac{M_{o_{\max}}}{W_o} = \frac{M_{o_{\max}}}{\frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{D_o^4 - d_o^4}{D_o} \right)} = \frac{522730,34}{\frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{85^4 - 26^4}{85} \right)} = 8,75 \text{ MPa}$$

Napětí v krutu

Je působeno krutícím momentem při čelním hrubování, $M_K = 48,2 \text{ N} \cdot \text{m}$, který je po celé délce hřídele konstantní. Napětí je určeno v maximu ohybového momentu, kvůli výpočtu redukovaného napětí.

Napětí v krutu v místě ložiska B

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_K} = \frac{M_K}{\frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{D_o^4 - d_o^4}{D_o} \right)} = \frac{48200}{\frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{85^4 - 26^4}{85} \right)} = 0,4 \text{ MPa}$$

Redukované napětí dle podmínky max τ

Pro zahrnutí více druhů napětí při kombinovaném namáhání vypočteme redukované napětí, které je fiktivní hodnotou tahového namáhání odpovídající namáhání skutečnému, a porovnáme jej s mezí kluzu.

$$\sigma_{RED}^{\max \tau} = \sqrt{\sigma_o^2 + 4 \cdot \tau_K^2} = \sqrt{8,75^2 + 4 \cdot 0,4^2} = 8,78 \text{ MPa}$$

Bezpečnost proti plastickým deformacím

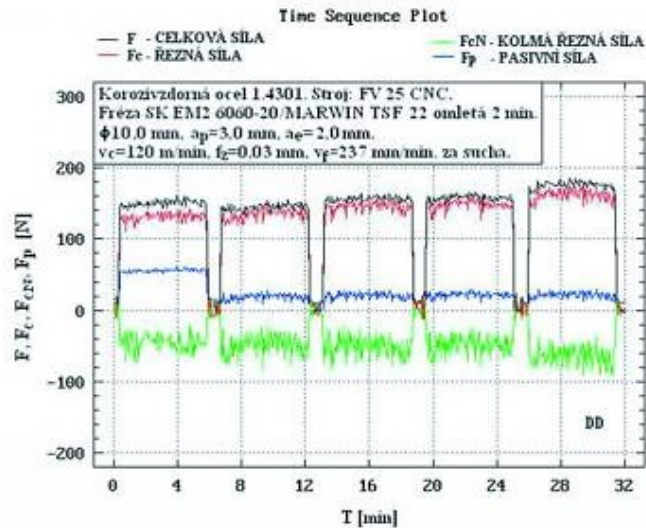
$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_{RED}^{\max \tau}} = \frac{300}{8,78} = 34,17$$

Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti je velmi vysoká a pokryje i vrubové účinky pro součinitele tvaru $\alpha = 17$ při $k_k = 2$.



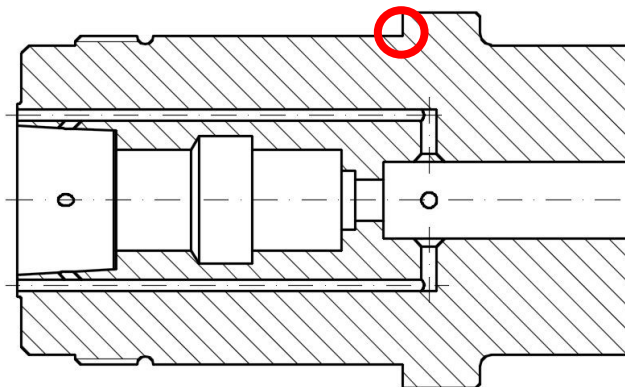
5.9.3 Kontrola hřídele vůči meznímu stavu únavy

Vzhledem k proměnnému charakteru řezné síly je vhodné provést kontrolu hřídele na únavové namáhání. Na obrázku 5.9 lze vidět skutečný průběhy řezné síly a jejich složek naměřených speciálními přístroji na frézce.



Obrázek 5.10: Praktický průběh sil při frézování v čase. [46]

Samotná kontrola je provedena pomocí vztahů z knihy [14] výpočtem koeficientu bezpečnosti dle volených kritérií. Na hřídeli uvažujeme řez v místě opření předního ložiska, kde je poměrně velká změna průměrů a v ostrém přechodu dochází ke koncentraci napětí.

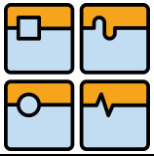


Obrázek 5.11: Kritické místo v řezu vřetenové hřídele.

Průměry v daném průřezu jsou:

$$D_u = 85\text{ mm}$$

$$d_u = 20\text{ mm}$$

Součinitele vrubu

Jejich hodnoty vychází z nomogramů a jsou závislé na rozdílu průměru hřídele v daném průřezu a poloměru zaoblení v daném místě. Určují se zvláště pro normálové i smykové napětí.

$$\beta_{\sigma} = 2,5$$

$$\beta_{\tau} = 2,4$$

Mez únavy při ohybu za rotace

$$\sigma_{Co} = 0,524 \cdot R_m = 0,504 \cdot 500 = 252 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu jakosti povrchu

$$a_u = 1,58$$

$$b_u = -0,085$$

$$k_a = a_u \cdot R_m^{b_u} = 1,58 \cdot 500^{-0,085} = 0,932$$

Součinitel vlivu velikosti tělesa

$$k_b = 1,5 \cdot (D_u - d_u)^{-0,157} = 0,779$$

Další součinitelé jsou rovny jedné; jsou to součinitelé:

vlivu zatěžování k_c

vlivu teploty k_d

spolehlivosti k_e

zahrnující další vlivy k_f .

Korigovaná mez únavy

$$\sigma_{Cok} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot \sigma_{Co} = 158,72 \text{ MPa}$$

Bezpečnost vůči MSÚ pro Gerberovo kritérium ve spojení s HMH

$$k_u = \frac{1}{\frac{16 \cdot \beta_{\sigma} \cdot M_{Omax}}{\pi \cdot (D_u - d_u)^3 \cdot \sigma_{Cok}} \cdot \left\{ 1 + \left[1 + 3 \cdot \left(\frac{\beta_{\tau} \cdot M_K \cdot \sigma_{Cok}}{\beta_{\sigma} \cdot M_{Omax} \cdot R_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}$$

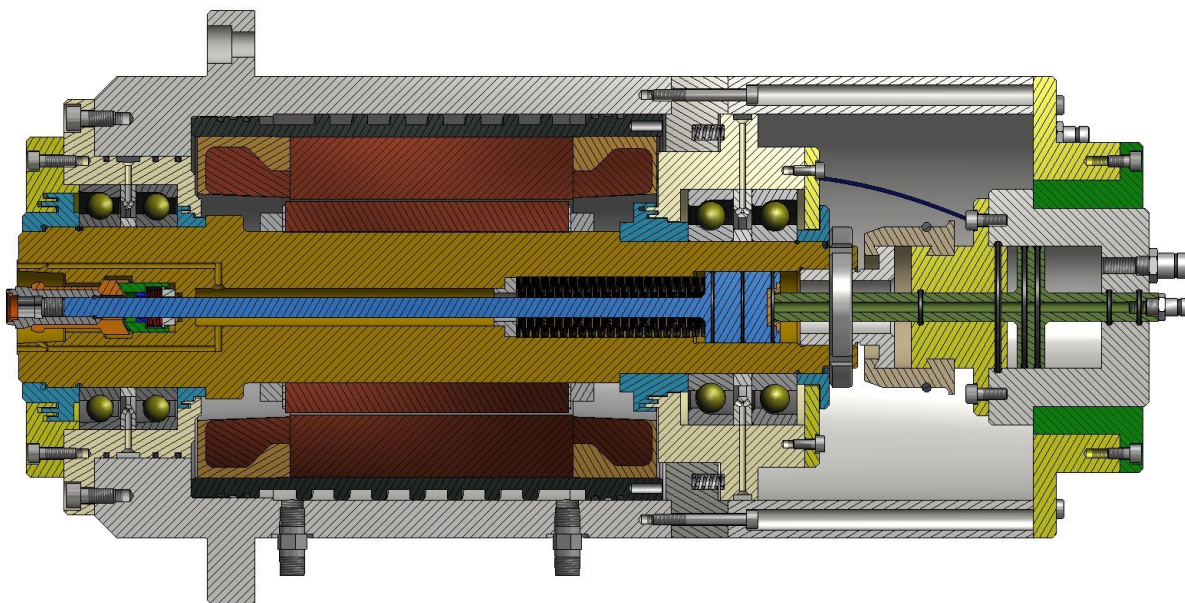
$$k_u = 3,27$$

Bezpečnosti vůči MSÚ je dostačující, reálně vyšší. Součinitel k_u je relativně nízký hlavně kvůli dutému průřezu, kde je počítáno pouze s plným materiálem (rozdíl průměrů).

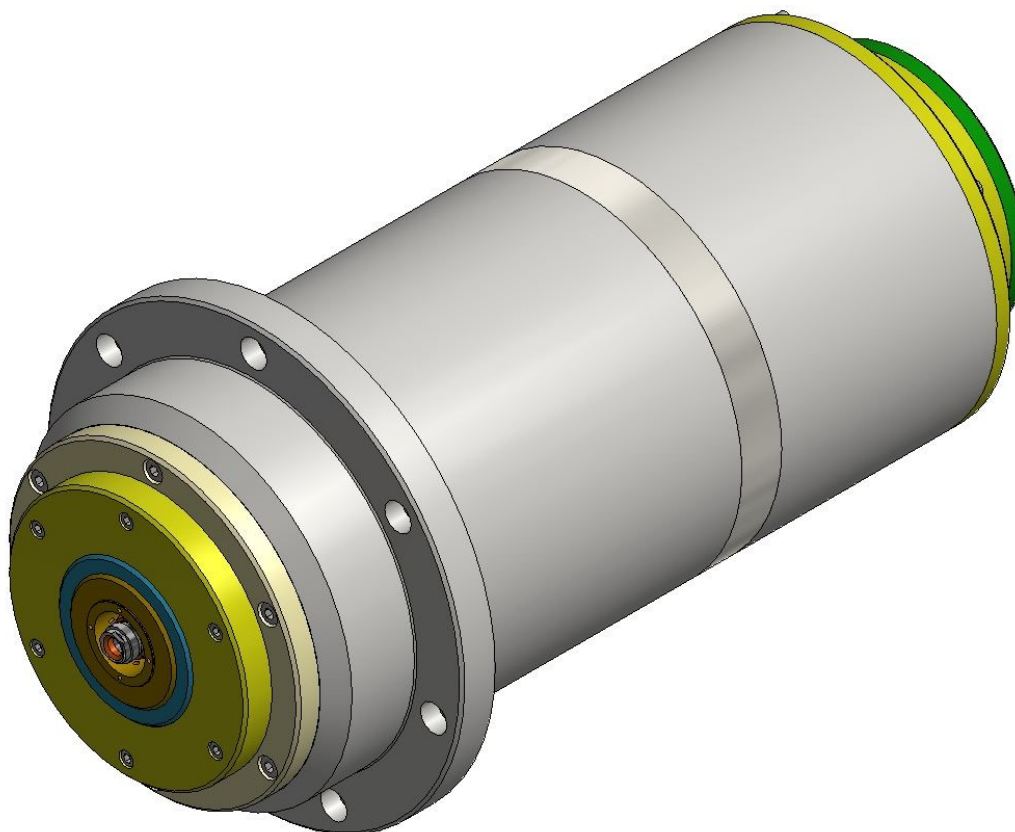


5.10 Konstrukční provedení vřetene

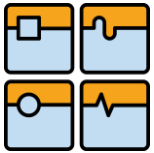
Celkové uspořádání součástí navrženého vřetene je na obrázku 5.12 a 5.13.



Obrázek 5.12: Řez 3D modelem navrženého frézovacího vřetene.



Obrázek 5.13: Tubus vřetene.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

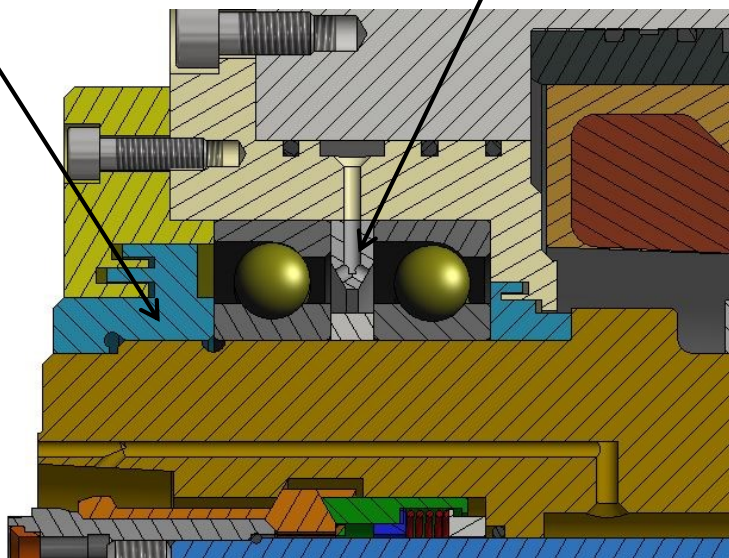
Vnitřní součásti jsou uloženy v dvoudílném tubusu se spojovacím mezikusem. Tubus je připevněn za přírubu pomocí šroubů M12 do vřeteníku stroje. Zadní část tubusu je s přední částí spojena šrouby M6 přes mezikus. Kvůli nedostatečné délce normalizovaných šroubů s válcovou hlavou jsou v zadní části tubusu vrtány dlouhé otvory hlavy šroubů, jejichž montáž vyžaduje poměrně dlouhý klíč na vnitřní šestihran.

Utěsnění ložiskového prostoru je řešeno pomocí nenormalizovaných labyrintových těsnění, u každé sady ložisek je jedno těsnění šroubované na hřídele a slouží také jako pojištění ložisek proti axiálnímu posuvu.

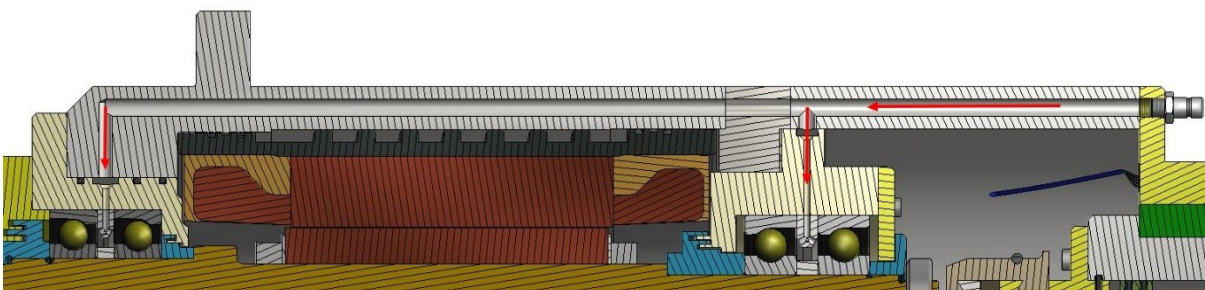
Mazání ložisek je řešeno pomocí systému „olej-vzduch“, jehož princip spočívá v přivedení malého, ale dostatečného množství oleje do ložisek. Výhodou je nižší produkované teplo v ložiscích a dosažení vyšších otáček v porovnání s jinými olejovými systémy. K tomuto účelu byly zkonstruovány rozvodné kroužky, které svými otvory směřují mazivo přímo do kontaktu valivých těles s ložiskovými kroužky. Olej se vzduchem je přiveden na zadní část vřetene, pomocí vrtaných kanálů proudí až k rozvodným kroužkům.

Závitové labyrintové těsnění

Rozvodný kroužek



Obrázek 5.14: Detail součástí v řezu.



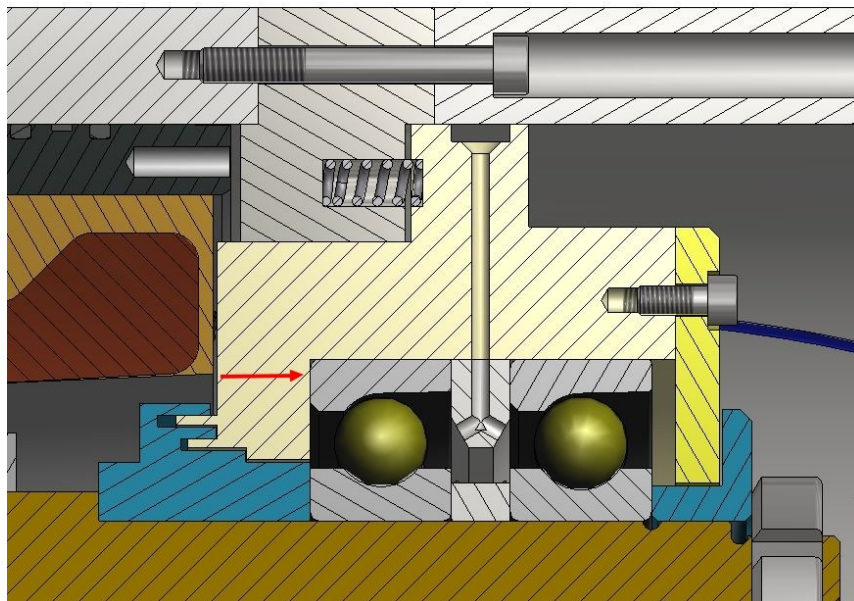
Obrázek 5.15: Přisun maziva k ložiskům.



Elektromotor je od výrobce přizpůsoben ke kapalinnému chlazení. K tomuto účelu jsou v pouzdře statoru šroubovitě drážky, kterými proudí chladicí kapalina. Ve spodní části obrázku 5.11 jsou zobrazeny konektory pro připojení hadic na přívod a odvod chladicí kapaliny.

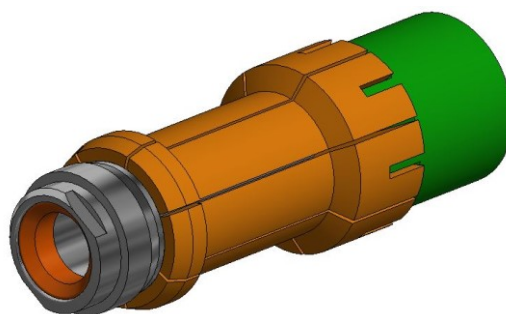
Model elektromotoru byl stažen z webu firmy Siemens.

Předeptnutí ložisek je v případě přední sady řešeno osovým posunutím kroužků, čehož je dosaženo patřičným dotažením závitového těsnění (obrázek 5.13). Zadní sada ložisek je předeptnuta pružinami umístěnými po obvodu příruby.

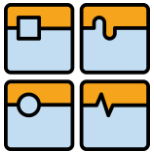


Obrázek 5.16: Předeptnutí zadní sady ložisek.

Upínací mechanismus byl navržen dle firemních katalogů OTT-Jakob, internetových videí a montážních postupů tohoto výrobce.

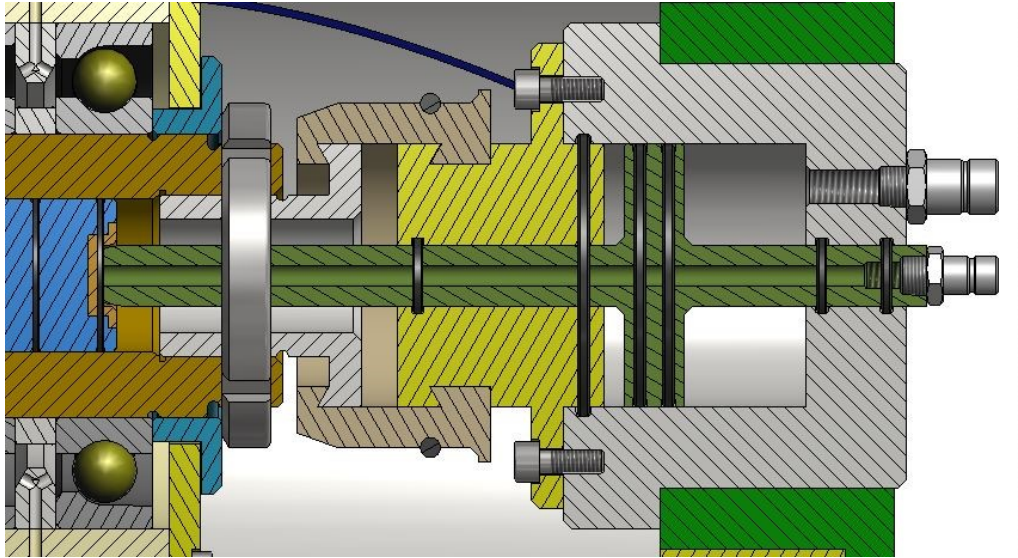


Obrázek 5.17: Sestavení upínacích kleštin.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Uvolňovací mechanismus je taktéž od stejného výrobce jako upínací systém a to OTT-Jakob. Vzhledem k nedostatečnému množství dokumentace byl vymodelován pouze schematicky, nicméně hlavní funkční část – hydraulický válec, je v modelu obsažena.



Obrázek 5.18: Uvolňovací mechanismus.



6 Závěr

Cílem této práce bylo zpracovat konstrukční návrh včetně frézovacího stroje. Konstrukce byla řešena pro v praxi relativně novou, perspektivní metodu obrábění HSM. První část práce (kapitoly 1–4) se věnují rešerši na téma frézovacích strojů, dále pak včetně těchto strojů. V kapitole 5 byly navrženy základní parametry stroje a provedeny příslušné výpočty.

Včetně je navrženo primárně pro vertikální stroj k HSC, díky motoru s vysokým točivým momentem jej lze použít i pro hrubování. Toho lze využít například u strojů v menších provozech, kde se vyrábí v malých sériích či po kusech. Stroj může dokončovat formy z nástrojové oceli, v případě nedostatku zakázek lze také hrubovat tvrdé materiály.

Samotný návrh výkonových parametrů byl proveden pro HSC karbidovou frézou, které klade nároky na vysoké otáčky a frézu s VBD pro hrubování, což zajistí vysoký točivý moment včetně. Motor byl vybrán synchronní s vnitřním chlazením od firmy Siemens, asynchronní motory nedosahují potřebných otáček. Uložení je proveden ve čtyřech kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem párovaných ve dvou do tandemu. Jejich mazání je zajištěno systémem olej-vzduch, díky rozvodným kroužkům je mazání efektivní.

Výpočty ke konstrukci byly provedeny v softwaru Mathcad 14.0, 3D model v programu Autodesk Inventor 2015 a technické výkresy v AutoCadu Mechanical 2015. Výkresy spolu s 3D modelem jsou součástí přílohy.

Na závěr jsou vypsány základní parametry včetně v tabulce.

Tabulka 5.16: Parametry včetně.

Určení včetně	vertikální stroj pro HSM a hrubování
Typ ložisek	přesná radiální kuličková s kosoúhlým stykem
Způsob mazání	olej-vzduch
Typ zástavby	tubus
Maximální výkon	28 kW
Maximální kroutící moment	75 N·m
Jmenovité otáčky	3500 min ⁻¹
Maximální otáčky	18000 min ⁻¹



7 Seznam použitých symbolů

Symbol	Rozměr	Veličina
v_c	$[m \cdot s^{-1}]$	řezná rychlost
R_m	$[MPa]$	mez pevnosti
Δ_A	$[\mu m]$	házivost předního konce vřetene
Δ_B	$[\mu m]$	házivost zadního konce vřetene
L	$[mm]$	vzdálenost ložisek
a	$[mm]$	vzdálenost předního ložiska od čela vřetene
δ	$[mm]$	celková deformace vřetene
δ_v	$[mm]$	deformace vřetene
δ_L	$[mm]$	deformace ložisek vlivem silových reakcí
δ_s	$[mm]$	deformace tělesa vřeteníku
F	$[N]$	výsledná řezná síla
E	$[MPa]$	modul pružnosti v tahu
J_1	$[mm^4]$	moment setrvačnosti části vřetena mezi ložisky
J_2	$[mm^4]$	moment setrvačnosti převíslé části vřetene
C_A	$[mm \cdot N^{-1}]$	poddajnost zadního ložiska
C_B	$[mm \cdot N^{-1}]$	poddajnost předního ložiska
$d\delta$	$[mm]$	diferenciál deformace
dL	$[mm]$	diferenciál délky
q	$[mm^2]$	lineární koeficient kubické rovnice
r	$[mm^3]$	konstantní koeficient kubické rovnice
x_1	$[mm]$	reálný kořen kubické rovnice
u	$[mm]$	první část reálného kořene kubické rovnice
v	$[mm]$	druhá část reálného kořene kubické rovnice
D_{c1}	$[mm]$	průměr stopkové frézy Seco
z_{c1}	$[-]$	počet zubů stopkové frézy Seco
v_{c1}	$[m \cdot s^{-1}]$	řezná rychlost stopkové frézy Seco
a_{p1}	$[mm]$	šířka záběru hlavního ostří stopkové frézy Seco
a_{e1}	$[mm]$	šířka řezu stopkové frézy Seco
D_{c2}	$[mm]$	průměr rovinné frézy Walter
z_{c2}	$[-]$	počet zubů rovinné frézy Walter
v_{c2}	$[m \cdot s^{-1}]$	řezná rychlost rovinné frézy Walter
a_{p2}	$[mm]$	šířka záběru hlavního ostří rovinné frézy Walter
a_{e2}	$[mm]$	šířka řezu rovinné frézy Walter
f_{z1}	$[mm/zub]$	posuv na zub stopkové frézy Seco
f_{z2}	$[mm/zub]$	posuv na zub rovinné frézy Walter
n_n	$[min^{-1}]$	nominální otáčky vřetene



Symbol	Rozměr	Veličina
$k_{c1.1}$	[MPa]	specifická řezná síla pro 1 mm ² třísky
m_c	[-]	hodnota nárůstu třísky
M_K	[N·m]	kroučící moment
P	[W]	výkon
h_{m2}	[MPa]	střední tloušťka třísky rovinné frézy Walter
k_{c2}	[MPa]	specifická řezná síla rovinné frézy Walter
F_{c2}	[N]	řezná síla rovinné frézy Walter
M_{Kmax}	[N·m]	maximální kroučící moment
h_{m1}	[mm]	střední tloušťka třísky stopkové frézy Seco
k_{c1}	[MPa]	specifická řezná síla stopkové frézy Seco
F_{c1}	[N]	řezná síla stopkové frézy Seco
M_{Kmin}	[N·m]	minimální pracovní kroučící moment
F_f	[N]	síla při posuvu v záběru při ponorném frézování
M_{Kp}	[N·m]	kroučící moment při ponorném frézování
n_{32}	[min ⁻¹]	otáčky vřetene při hrubování
v_f	[m·s ⁻¹]	posuvová rychlost při hrubování
n_{pmax}	[min ⁻¹]	maximální pracovní otáčky vřetene
M_{Kn}	[N·m]	kroučící moment při nominálních otáčkách
n_N	[min ⁻¹]	jmenovité otáčky elektromotoru
n_{max}	[min ⁻¹]	maximální otáčky elektromotoru
M_N	[N·m]	jmenovitý kroučící moment elektromotoru
C_B	[kN]	dynamická únosnost předního ložiska
C_{0B}	[kN]	statická únosnost předního ložiska
D_B	[mm]	vnější průměr předního ložiska
d_B	[mm]	vnitřní průměr předního ložiska
B_B	[mm]	šířka předního ložiska
k_{rB}	[N·μm ⁻¹]	radiální tuhost předního ložiska
C_A	[kN]	dynamická únosnost zadního ložiska
C_{0A}	[kN]	statická únosnost zadního ložiska
D_A	[mm]	vnější průměr zadního ložiska
d_A	[mm]	vnitřní průměr zadního ložiska
B_A	[mm]	šířka zadního ložiska
k_{rA}	[N·μm ⁻¹]	radiální tuhost zadního ložiska
D_2	[mm]	vnější průměr pod předním ložiskem
d_2	[mm]	vnitřní průměr pod předním ložiskem
D_1	[mm]	vnější průměr pod zadním ložiskem
d_1	[mm]	vnitřní průměr pod zadním ložiskem



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Symbol	Rozměr	Veličina
F_{rB}	[N]	radiální silová reakce v předním ložisku
F_{rA}	[N]	radiální silová reakce v zadním ložisku
c	[mm]	celkové vyložení nad předním ložiskem
F_{Ch}	[N]	řezná síla při HSM
F_y	[N]	síla v ose y
M_A	[N·m]	ohybový moment k bodu A
F_{rBh}	[N]	radiální silová reakce v předním ložisku při HSM
F_{rAh}	[N]	radiální silová reakce v zadním ložisku při HSM
F_{pB}	[N]	síla předpětí předního ložiska
F_u	[N]	tíha součástí vřetene uložených v ložiscích
F_{pA}	[N]	síla předpětí zadního ložiska
F_{uv}	[N]	síla vyvozena hydraulickým uvolňovačem nástrojů
F_{pAS}	[N]	skutečná síla předpětí zadního ložiska
F_{pBS}	[N]	skutečná síla předpětí předního ložiska
m_u	[kg]	hmotnost součástí vřetena uložených v ložiscích
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
f_B	[-]	součinitel únosnosti sady předních ložisek
f_{0B}	[-]	součinitel ekvivalentního zatížení předních ložisek
a_B	[-]	součinitel tvaru valivých těles předních ložisek
F_{aB}	[N]	axiální síla působící na přední ložisko
C_{Bs}	[N]	dynamická únosnost páru předních ložisek
e_B	[-]	kritérium ekvivalentního zatížení předního ložiska
X_{2B}	[-]	součinitel radiálního zatížení předního ložiska
Y_{2B}	[-]	součinitel axiálního zatížení předního ložiska
P_B	[N]	ekvivalentní dynamické zatížení předních ložisek
L_{10B}	[h]	základní trvanlivost předních ložisek
F_{aA}	[N]	axiální síla působící na zadní ložisko
C_{As}	[N]	dynamická únosnost páru zadních ložisek
P_A	[N]	ekvivalentní dynamické zatížení zadních ložisek
L_{10A}	[h]	základní trvanlivost zadních ložisek
C_{0As}	[N]	statická únosnost páru zadních ložisek
p_{uv}	[MPa]	tlak hydraulické kapaliny uvolňovače nástrojů
S_{uv}	[cm ²]	plocha pístu uvolňovače nástrojů
P_{0A}	[N]	ekvivalentní statické zatížení zadních ložisek
S_{0A}	[-]	bezpečnost vůči statickému porušení zadních ložisek
k	[N·μm ⁻¹]	tuhost předního konce vřetene
R_e	[MPa]	mez kluzu



Symbol	Rozměr	Veličina
D_o	[mm]	vnější průměr pro výpočet ohybového napětí
d_o	[mm]	vnitřní průměr pro výpočet ohybového napětí
$M_{o\max}$	[N·m]	maximální ohybový moment
$\sigma_{o\max}$	[MPa]	maximální ohybové napětí
W_o	[mm ⁴]	kvadratický modul průřezu v ohybu
τ_K	[MPa]	napětí v krutu
W_K	[mm ⁴]	kvadratický modul průřezu v krutu
σ_{RED}	[MPa]	reduované napětí
k_k	[-]	bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti
α	[-]	součinitel tvaru
D_u	[mm]	vnější průměr průřezu při kontrole vůči MSÚ
d_u	[mm]	vnitřní průměr průřezu při kontrole vůči MSÚ
β_σ	[-]	součinitel vrubu pro normálové napětí
β_τ	[-]	součinitel vrubu pro smykové napětí
σ_{Co}	[MPa]	mez únavy při ohybu za rotace
k_a	[-]	součinitel vlivu jakosti povrchu
k_b	[-]	součinitel vlivu velikosti tělesa
k_c	[-]	součinitel vlivu zatěžování
k_d	[-]	součinitel vlivu teploty
k_e	[-]	součinitel spolehlivosti
k_f	[-]	součinitel zahrnující další vlivy
σ_{Cok}	[MPa]	korigovaná mez únavy
k_u	[-]	bezpečnost vůči meznímu stavu únavy

8 Seznam obrázků

1.1	Moderní frézovací centrum DMG Mori Seiki	11
1.2	Vřetenno pro vysokorychlostní obrábění	11
2.1	Ukázka frézování – rohová fréza Seco Turbo 10	12
2.2	Schéma válcového frézování	13
2.3	Schéma čelního frézování	13
2.4	Monolitické frézy	14
2.5	Válcová rovinná fréza s VBD	15
2.6	Kotoučová fréza s VBD	15
2.7	Odvalovací fréza na výrobu evolventního ozubení	15
2.8	Válcová fréza rádiusová	15
3.1	První frézovací stroj roku 1818	16
3.2	Univerzální frézka na výrobu vrtáků z roku 1862	16
3.3	Servomotor pro pohon posuvové osy	17
3.4	Rozdělení frézovacích strojů dle konstrukčního uspořádání	18
3.5	Vodorovná konzolová frézka	18
3.6	Otočný stůl univerzální frézky	18
3.7	Svislá konzolová frézka	19
3.8	Univerzální hlava	19
3.9	Upínání nástrojů	19
3.10	Variety konzolových frézek s výsuvným vřeteníkem	20
3.11	Vodorovná konzolová frézka TOS Olomouc FGU 32	20
3.12	Provedení stolových (ložových) frézek běžné koncepce	21
3.13	Novější koncepce stolových frézek	21
3.14	Stolová frézka Knuth KB 1400	22
3.15	Vodorovné varianty rovinných frézek	23
3.16	Rovinné frézky s výložníkem	23
3.17	Variety portálových frézek	24
3.18	Portálová CNC frézka XYZ BRM 50-100-150	24
3.19	Variety nástrojařské frézky	25
3.20	Kopírovací frézka se svislými vřeteny	25
3.21	Dvouvřetenová karuselová frézka	26
3.22	Výroba ozubení odvalovacím způsobem	26
3.23	Rozdělení CNC obráběcích center na nerotační součásti	27
3.24	Třídění víceosých CNC center pro nerotační součásti dle počtu os	27
3.25	Odkrytované vodorovné OC značky Okuma, řady MA	28
3.26	Svislé obráběcí centrum DMG Moki Seiki HVM 630	29
3.27	Ukázka dopravy třísek na stroji Moki Seiki	29

4.1	Elektrovřetena firmy Omlat	30
4.2	Elektrovřeteno GMN v řezu	31
4.3	Morfologie vřetena	31
4.4	Radiální házení vřetena	32
4.5	Vliv házení ložisek na přesnost chodu vřetene	33
4.6	Vliv házení ložisek na přesnost chodu vřetene	34
4.7	Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem	37
4.8	Konstrukční varianty kroužků válečkových ložisek	37
4.9	Ukázka uložení ve valivých ložiscích	38
4.10	Nabídka vysoce přesných ložisek firmy SKF	38
4.11	Nastavení předpětí v ložisku	39
4.12	Možnosti mazání vřetenových ložisek	40
4.13	Vřeteno firmy SKF-S2M uložené v magnetických ložiscích	41
4.14	Vřeteno s řemenovým převodem značky Setco	41
4.15	Vřeteno vertikálního OC Hyundai Wia	42
4.16	Vřeteno Fischer Spindle	42
4.17	Elektrovřeteno Weiss	43
4.18	Držák pro upínání stopkových fréz ISO 40	43
4.19	Nástrojové držáky	44
4.20	Upnutí držáku nástrojů ISO upínačem OTT Jakob	44
4.21	Upnutí držáku nástrojů HSK-E upínačem OTT Jakob	45
4.22	Čištění upínacího kužele tlakem vzduchu	45
4.23	Uvolňovací jednotka	45
4.24	Diagnostika vřetene	46
5.1	Ukázka suchého frézování slitiny titanu	47
5.2	Stopková fréza Seco Tornado JH130	48
5.3	Rovinná fréza Walter Mini-KW F 2233	48
5.4	Synchronní vestavěný („built-in“) motor Siemens řady 1FE1	52
5.5	Výkonová a momentová charakteristika motoru	53
5.6	Schéma uložení ložisek do tandemu na prvotním návrhu hřídele	54
5.7	Schéma náhradního nosníku pro vřeteno při čelním frézování	56
5.8	Schéma axiálních sil působících na vřetenová ložiska	58
5.9	Schéma náhradního nosníku a průběhu zátěžných momentů	65
5.10	Praktický průběh sil při frézování v čase	67
5.11	Kritické místo v řezu vřetenové hřídele	67
5.12	Řez 3D modelem navrženého frézovacího vřetene	69
5.13	Tubus vřetene	69

5.14	Detail součástí v řezu	70
5.15	Přísun maziva k ložiskům	70
5.16	Předepnutí zadní sady ložisek	71
5.17	Sestavení upínacích kleštín	71
5.18	Uvolňovací mechanismus	72


9 Seznam tabulek

4.1	Standardní třídy přesnosti dle různých norem	38
4.2	Porovnání ložiskových materiálů	39
5.1	Parametry stopkové frézy Seco Tornado JH130	48
5.2	Parametry rovinné frézy Walter Mini-KW F 2233	48
5.3	Otáčky vřetene pro různé nástroje	49
5.4	Parametry pro volbu motoru	51
5.5	Parametry vybraného motoru	52
5.6	Parametry upínacího zařízení OTT Jakob HSK-E50	53
5.7	Parametry předního vřetenového ložiska	54
5.8	Parametry zadního vřetenového ložiska	54
5.9	Parametry pro výpočty reakcí ložisek	56
5.10	Hlavní parametry pro výpočet trvanlivosti	59
5.11	Parametry procesu pro výpočet trvanlivosti	59
5.12	Parametry procesu pro výpočet trvanlivosti	60
5.13	Parametry procesu pro výpočet trvanlivosti	61
5.14	Hlavní parametry pro výpočet trvanlivosti	62
5.15	Parametry procesu pro výpočet trvanlivosti	62
5.16	Parametry vřetene	73







10 Seznam použitých zdrojů

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. 2003 [cit. 2015-03-25]. Dostupné také z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
- [2] *Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů* [online]. 2011 [cit. 2015-03-25]. Dostupné také z: <http://www.tumlikovo.cz/>
- [3] Studijní opory předmětu 6SR Stavba výrobních strojů a robotů. *Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky* [online]. 2013 [cit. 2015-03-26]. Dostupné také z: http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=23
- [4] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [5] BORSKÝ, Václav. *Obráběcí stroje*. Vyd. 1. Brno: Nakladatelství VUT, 1992, 216 s. ISBN 80-214-0470-1.
- [6] *TOS OLOMOUC, s.r.o.: Univerzální a produkční konzolové frézky, numericky řízené (CNC) konzolové frézky, příslušenství*. [online] 2009 [cit. 2015-05-07]. Dostupné také z: <http://www.tos-olomouc.cz/oc-cz/>
- [7] *PILART s. r. o.* [online] b.r. [cit. 2015-05-07]. Dostupné také z: <http://www.pilart.cz/>
- [8] ŽENÍŠEK, J., J. KRATOCHVÍL, VI. VACEK a B. ZIEBA *Teorie a konstrukce obráběcích strojů II: Obráběcí stroje*. Praha: SNTL, 1988.
- [9] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [10] BRENÍK, Přemysl. *Obráběcí stroje. Konstrukce a výpočty: konstrukce a výpočet*. 2. oprav. vyd. Praha: SNTL, 1986, 573 s.
- [11] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991, 214 s. ISBN 80-214-0361-6.
- [12] Super přesná ložiska. *SCHAEFFLER* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/brochure/downloads_1/ac_41130_7_de_cz.pdf
- [13] *SKF* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: <http://www.skf.com/cz>
- [14] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [15] *Machine tools for high performance machining* [online]. London: Springer, c2009, xxii, 442 s. [cit. 2015-05-09]. ISBN 978-1-84800-379-8.
- [16] Measuring the thermal extension in spindles. *Micro-Epsilon* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: http://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/eddy-current-sensor/eddy_SGS4701/index.html
- [17] Katalog frézování. *Seco Tools* [online]. b.r. [cit. 2015-05-16]. Dostupné také z: https://www.secotools.com/CorpWeb/Service_Support/machining_navigator/CEE/Czech/Final_LR_CZ_Jabro.pdf
- [18] Souhrnný katalog. *Walter Tools* [online]. b.r. [cit. 2015-05-16]. Dostupné také z: <http://www.waltertools.blaetterkatalog.de/gc2012/cz/>
- [19] *DMG MORI Czech* [online]. 2015 [cit. 2015-03-25]. Dostupné také z: <http://cz.dmgmori.com/>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 82
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [20] Seco rozšiřuje produktovou řadu fréz pro frézování do rohu Turbo 10. *PRUMYSL.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-03-25]. Dostupné také z: <http://www.prumysl.cz/seco-rozsiruje-produktovou-radu-frez-pro-frezovani-do-rohu-turbo-10/>
- [21] Frézy válcové a válcové čelní se stopkou válcovou SK. *Výrobce a dodavatel nástrojů. | ZPS-FN a.s.* [online] 2015 [cit. 2015-03-25]. Dostupné také z: <http://www.zps-fn.cz/frezy-valcove-a-valcove-celni-se-stopkou-valcovou-sk/3388id/frezy-valcove-celni-kratke,-1-brit-pres-stred,-30,-din-6527-k,-typ-n,-hladka-stopka,-sk1/>
- [22] *ECatalog Pramet Tools s.r.o.* [online] 2015 [cit. 2015-03-25]. Dostupné také z: <http://ecat.pramet.com/default.aspx>
- [23] *KASIKTOOLS* [online]. 2015 [cit. 2015-03-25]. Dostupné také z: <http://www.kasiktools.cz/cz/>
- [24] *DirectIndustry - The Virtual Industrial Exhibition* [online]. 2015 [cit. 2015-03-26]. Dostupné také z: <http://www.directindustry.com/>
- [25] *TN Trade* [online]. 2015 [cit. 2015-03-27]. Dostupné také z: <http://www.tntrade.cz/default.asp?>
- [26] *STIMZET Nástroje na otvory* [online]. 2015 [cit. 2015-03-27]. Dostupné také z: <http://www.stimzet.cz/>
- [27] *Tyntech - třískové obráběcí stroje* [online]. b.r. [cit. 2015-03-27]. Dostupné také z: <http://www.tyntech.cz/>
- [28] *XYZ Machine Tools UK: Suppliers of Precision Engineering Machines* [online]. b.r. [cit. 2015-05-07]. Dostupné také z: <http://www.xyzmachinetools.com/>
- [29] Odvalovací frézy. *Strojimport: Machine tools, forming machines and investment units into the wide world.* [online] b.r. [cit. 2015-05-07]. Dostupné také z: <http://www.strojimport.cz/stroje-na-vyrobu-ozubeni/odvalovaci-frezky/>
- [30] Frézování ozubených kol. *ELUC: Elektronická Učebnice* [online]. b.r. [cit. 2015-05-07]. Dostupné také z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/1237>
- [31] *OMLAT: World leader in high precision* [online]. b.r. [cit. 2015-05-08]. Dostupné také z: <http://www.omlat.com/en/>
- [32] Machine tools. *Eunda: Elektromaschine und Antriebe* [online]. b.r. [cit. 2015-05-08]. Dostupné také z: <http://www.eunda.ch/en/applications/machine-tools.html>
- [33] EMO Hannover počtvrté: Vřetená a vřetenová ložiska. *MM Průmyslové spektrum* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/emo-hannover-poctvrte-vretena-a-vretenova-loziska.html>
- [34] Sentry Precision Spindles. *SETCO* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: http://www.setco.com/_setco/assets/File/Literature/S_0005_1a_Sentry.pdf
- [35] F700 Series: Product Details. *Hyundai Wia Europe GmbH.* [online] b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: <http://www.hyundai-wia.de/en/products/vertical-machining-centers/product-details.html?f700-series-55>
- [36] Fischer Products. *Fischer Spindle* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: <http://www.fischer-spindle.com/products/?brand=fischer/precise/fortuna&application=milling/&p=all>
- [37] *Weiss GmbH.* [online] <http://www.weissgmbh.com/>. b.r. [cit. 2015-05-09].
- [38] *PILANA MCT: Nástroje pro NC stroje* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: <http://www.pilanamct.cz/cz>

 	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 83
 	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [39] HSK 63A Werkzeugaufnahme. *Http://www.yatego.com* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: http://www.yatego.com/gego-shop/p,4f882308ee0cb,47c82751ac66a1_9,hsk-63a-werkzeugaufnahme-l-100-mm-er40-g6-3-din69893a
- [40] Power Collet Chuck: DIN 69893-5 · HSK-E25. *HAIMER* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: <http://www.haimer.biz/products/tool-holders/din-69893-hsk-a-hsk-e-hsk-f/hsk-e25/collet-chuck/power-collet-chuck.html>
- [41] Katalog. *OTT Jakob: Spanntechnik* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: <http://www.ott-jakob.de/dt/katalog/katalog.php>
- [42] *GMN Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG* [online]. b.r. [cit. 2015-05-09]. Dostupné také z: <http://www.gmn.de/>
- [43] Equipment for Machine Tools. *Siemens Automation* [online]. b.r. [cit. 2015-05-18]. Dostupné také z: http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/mc/Documentsu20Catalogs/NC62_2012_E2.pdf
- [44] Synchronous Built-in Motors 1FE1. *Siemens Automation* [online]. b.r. [cit. 2015-05-18]. Dostupné také z: https://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINUMERIK_SIMODRIVE_04_2010_E/PFE1.pdf?p=1
- [45] Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. b.r. [cit. 2015-05-23]. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi.html>
- [46] Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky. *MM Průmyslové spektrum* [online]. b.r. [cit. 2015-05-23]. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mechanicka-uprava-monolitnich-nastroju-pred-pvd-povlaky.html>



11 Seznam příloh

CD-ROM	elektronická verze bakalářské práce 3D model vřetene výkres sestavy vřetene kusovník výrobní výkres vřetenové hřídele výrobní výkres tubusu výrobní výkres přední příruby	.pdf soubor .ipt, .iam soubory .pdf soubor .pdf soubor .pdf soubor .pdf soubor .pdf soubor
Tištěné výkresy	výkres sestavy vřetene kusovník výrobní výkres vřetenové hřídele výrobní výkres tubusu výrobní výkres přední příruby	formát A0 4x formát A4 formát A1 formát A1 formát A2