



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

## NÁVRH VŘETENÍKU FRÉZOVACÍHO CENTRA

DESIGN OF CARTRIDGE SPINDLE FOR MILLING MACHINES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Vodička

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2025



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Tomáš Vodička</b>
Studijní program:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Pavlík, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2024/25

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

## Návrh vřeteníku frézovacího centra

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte řešení vestavného vřeteníku frézovacího centra. Vřeteno bude určeno pro stroje s výkonem do 10 kW a bude umožňovat automatickou výměnu nástrojů s rozhraním HSK. Zbývající charakteristiky budou součástí návrhu.

### Cíle diplomové práce:

Rozbor současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.  
Návrh variant řešení a zdůvodnění výběru konkrétního řešení.  
Konstrukční návrh zvolené varianty – 3D model.  
Nezbytné výpočty potřebné pro návrh a dimenzování.  
Výkresová dokumentace vybraných uzlů.  
Závěr a doporučení pro praxi.

### Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh a konstrukci vestavěného vřeteníku frézovacího centra o výkonu 10kW. Vřeteník musí umožňovat automatickou výměnu nástrojů HSK. V práci je provedena rešerše jednotlivých prvků vřetena a současně dostupných řešeních na trhu. Je navrženo několik koncepčních řešení, z nich je vybráno nejvhodnější, které se práce následně zabývá. Pro zvolené řešení je proveden návrh a dimenzování stěžejních prvků ze kterého vychází konstrukce vřetene. Pro vřeteno je vytvořen 3D model a vybraná výkresová dokumentace.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis focuses on the design and construction of a built-in spindle of a milling center with a power of 10kW. The spindle must allow for automatic HSK tool change. The thesis researches individual spindle elements and currently available solutions on the market. Several conceptual solutions are proposed, from which the most suitable one is selected, which is subsequently worked on in the thesis. For the chosen solution, the design and dimensioning of the key elements is carried out, from which the spindle design is based. A 3D model and selected drawing documentation are created for the spindle.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Elektrovřeteno, vřeteník, vřeteno, frézovací vřeteno, výměna nástrojů HSK

## **KEYWORDS**

Electric spindle, spindle, milling spindle, tool change HSK



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VODIČKA, Tomáš. *Návrh vřeteníku frézovacího centra*. Diplomová práce. Jan PAVLÍK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D. za jeho rady a připomínky při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a zejména rodičům za podporu při studiu a dědovi Ing. Janu Sobolovi za cenné praktické rady.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Pavlíka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23.5.2025

.....

Vodička Tomáš



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>VŘETENÍK FRÉZOVACÍHO CENTRA</b> .....	<b>17</b>
2.1	Zástavba vřetene .....	17
2.2	Uložení vřetene .....	18
2.2.1	Ložiska.....	18
2.2.2	Uspořádání ložisek .....	20
2.2.3	Mazání ložisek vřetene .....	21
2.2.4	Zatěsnění ložisek .....	22
2.3	Přesnost/tuhost vřetene .....	23
2.4	Pohon vřetene .....	24
2.4.1	Přímý náhon.....	24
2.4.2	Nepřímý náhon .....	25
2.5	Systémy upnutí nástroje.....	25
2.5.1	ISO kužel/BIG-PLUS .....	26
2.5.2	HSK .....	27
2.5.3	Coromant Capto.....	28
2.5.4	KMTS/KM4X.....	28
2.6	Přívod chladicí kapaliny/vzduchu.....	29
2.7	Diagnostické prvky .....	29
2.8	Dostupná řešení na trhu .....	30
2.8.1	Kessler řada V100.....	30
2.8.2	Omlat řada DELTA .....	31
2.8.3	NSK W-B .....	31
2.8.4	Výstup z rešerše a srovnání vřeten .....	32
<b>3</b>	<b>KONCEPCE NAVRHOVANÉHO VŘETENE</b> .....	<b>33</b>
3.1	Požadavky na vřeteno .....	33
3.2	Konstrukční koncepce.....	34
3.2.1	S přímým náhonem.....	34
3.2.2	S vloženou převodovkou .....	34
3.2.3	S vloženým převodem .....	35
3.2.4	Elektrovřeteno .....	35
3.2.5	Hodnocení koncepcí .....	36
<b>4</b>	<b>NÁVRH KLÍČOVÝCH UZLŮ</b> .....	<b>37</b>
4.1	Návrh technologických operací .....	37
4.1.1	Frézování(hrubování) .....	37
4.1.2	Vrtání.....	39
4.1.3	Moment potřebný pro obrábění .....	39
4.2	Návrh elektromotoru.....	40
4.3	Reakční síly.....	41
4.4	Návrh ložisek .....	44
4.4.1	Volba ložiskového uspořádání.....	44
4.4.2	Životnost ložisek.....	46
4.4.3	Mazání ložisek.....	49
4.4.4	Domazávací interval ložisek.....	49
4.5	Tuhost elektrovřetena .....	52
4.5.1	Tuhost vřetene .....	52

4.5.2	Tuhost ložisek .....	54
4.5.3	Celková tuhost elektrovřetene .....	55
<b>5</b>	<b>KONSTRUKCE .....</b>	<b>56</b>
5.1	Přední uložení vřetena .....	56
5.2	Těsnící víko .....	57
5.3	Zadní uložení vřetene .....	58
5.4	Vřeteno .....	59
5.5	Nosné tělo elektrovřetene .....	60
5.6	Senzorika vřetene .....	61
5.7	Postup montáže.....	62
5.8	Upínací a uvolňovací mechanismus výměny nástrojů .....	63
5.8.1	Upínací kleština.....	63
5.9	Odepínací jednotka .....	63
5.9.1	Rotační převodník médií .....	65
5.10	Připojovací rozhraní .....	66
5.11	Požadavky na uživatele .....	67
5.12	Požadavky na chlazení .....	68
<b>6</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE .....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>73</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>77</b>
9.1	Seznam symbolů.....	77
9.2	Seznam tabulek.....	79
9.3	Seznam obrázků.....	80
<b>10</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>83</b>

# 1 ÚVOD

Frézovací vřeteno představuje klíčový dynamický uzel obráběcího stroje, jehož primární funkcí je upnutí nástroje a zajištění přesného rotačního pohybu, který umožní úběr materiálu na základě přivedeného kroutícího momentu. Jedná se o komplexní sestavu, která zásadně ovlivňuje přesnost, tuhost, dynamické vlastnosti a produktivitu celého technologického procesu.

Konstrukce vřetene a celého vřeteníku vždy závisí na typu stroje do kterého je implementován. Některá řešení jsou specificky konstruovaná pro jeden konkrétní typ stroje, zatímco jiná řešení, jako například tubusová elektrovřetena, jsou výrazně univerzálnější a je možné je implementovat ve větším množství typů obráběcích strojů a příslušenství. Výhodou je možnost ve stejné zástavbě implementovat více výkonnostních řad a tím reagovat na změny technologií. Díky tomu je na trhu dostupné velké množství vřeten pro téměř všechny typy obráběcích technologií. Podle předpokládaného umístění vřetene a předpokládaných technologických operacích se odvíjí i požadavky na vřeteno a na přesnost jeho výroby.

Zadání diplomové práce je konstrukce vestavěného vřeteníku pro frézovací centrum o výkonu 10kW s automatickou výměnou nástrojů. Další požadavky nejsou určeny, budou proto zvoleny dodatečné parametry upřesňující návrh a konstrukci vřetene.

V práci bude zahrnuta rešerše současného stavu poznání, ve které bude proveden rozbor v současnosti používaných řešení vřetene pro frézovací centra. Koncepce navrhovaného vřetene, kde budou popsány možné řešené konstrukce. Návrh částí elektrovřetene pro zvolení kupovaných částí a poté samotná konstrukce vřetene. V poslední řadě bude v práci zahrnuta diskuse k možným výhodám, nedostatkům a alternativním řešením v práci zkonstruovaného vřetene.



## 2 VŘETENÍK FRÉZOVACÍHO CENTRA

Vřeteník frézovacího centra (v mnoha bodech i obecně vřeteník obráběcích strojů) lze rozdělit na několik hlavních oblastí [1]:

- Uložení (ložiska) vřetene
- Pohon vřetene
- Zástavba vřetene
- Nástrojové rozhraní
- Upínání nástrojů
- Diagnostické nástroje

Volbu různých řešení jednotlivých oblastí ovlivňují požadavky na vřeteno jako například požadovaná přesnost, typ obráběcí operace, na kterou je vřeteno určeno, výkon, atd.

### 2.1 Zástavba vřetene

Používá se dvou typů zástavby vřetene, které se odvozují podle tvaru vřetene, a to skříňové nebo tubusové.

Tubusové vřeteno je válcového tvaru, vyznačuje se jednodušší výměnou při poruše, lze jednoduše vyměnit kus za kus, to snižuje dobu odstávky, dále se vyznačuje vyšší výkonovou hustotou a je jednodušší na výrobu.

Skříňové vřeteno má krabicovou vřetenovou skříň a oproti tubusovému je tužší a používá se, když požadujeme větší výsuv pinoly od vřetene, je složitější na výrobu.



Obr. 1) Elektrovřeteno Kessler MT80 [2], (vlevo), skříňové vřeteno v (vpravo)[1]

## 2.2 Uložení vřetene

Způsob uložení se odvíjí od požadavků na vřeteno a jeho aplikace, podle toho se volí typ ložisek, jejich uspořádání, velikost a přesnost.

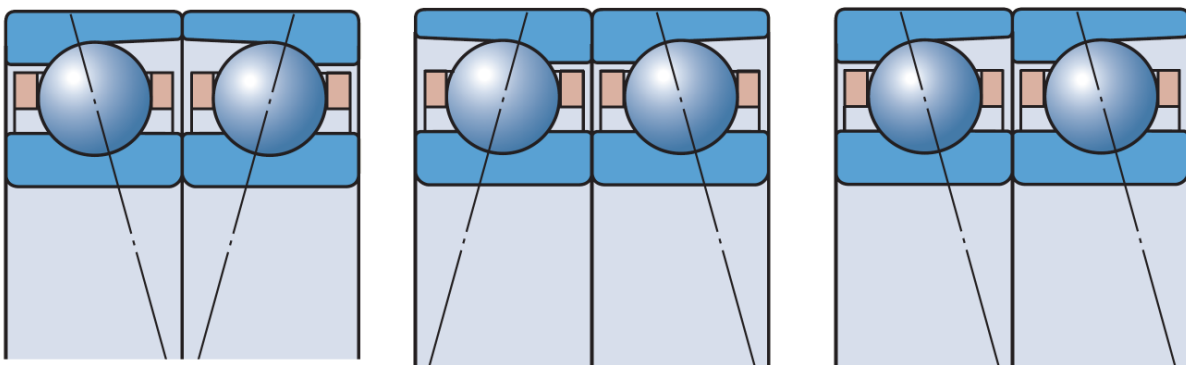
### 2.2.1 Ložiska

Pro uložení vřetene lze využít kluzných ložisek, elektromagnetických a vzduchových ložisek, které se používají hlavně pro přesná vysokorychlostní vřetena, jejichž výhodou je, že nedochází k významnému přenosu tepla mezi vřetenem a vřeteníkem. V naprosté většině případů se ale používá valivých ložisek především pro jejich snadnou údržbu, vysoké provozní zatížení, nízkou cenu a dostupnost v mnoha provedeních, jak rozměrových, tak kvalitativních.

U vřeteníků frézovacích strojů se nejčastěji používají kuličková ložiska s kosoúhlým stykem v kombinaci s válečkovými ložisky. V některých případech se využívá místo kosoúhlých ložisek kuželíkových, ty mají vyšší tuhost za cenu větších rozměrů a vyšší hmotnosti, což má za následek vyšší moment hybnosti při pohybu vřetene. To obecně platí u všech ložisek vhodných pro stavbu vřeteníku. Vždy je volen kompromis mezi velikostí zástavbového prostoru a tuhostí zvolených ložisek. V některých případech se používají keramické valivé elementy, které jsou tvrdší a lehčí než ocelové s horším přenosem tepla. Díky tomu se nepřenáší teplo z vřetena na vřeteník.[3]

#### 2.2.1.1 Radiální ložiska s kosoúhlým stykem

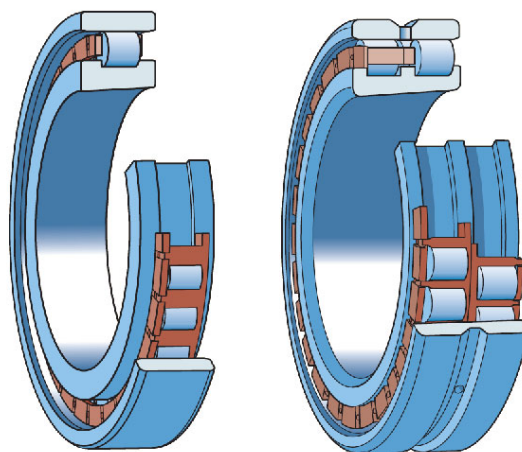
Přenáší radiální síly a axiální síly. Samostatné ložisko dokáže přenášet axiální síly pouze v jednom směru. Po jejich uspořádání do sad, do „O“ nebo do „X“ (viz obr. 2) a jejich předepnutí, mohou přenášet axiální síly v obou směrech. Sada do „O“ lépe přenáší momentové zatížení díky široké rozteči účinných středů ložisek, sada do „X“ má účinné středy blíže sobě, proto není vhodná pro přenášení momentových zatížení, tudíž není vhodná pro použití u frézovacích vřeteníků. Dále se tato uspořádání kombinují s uspořádáním do tandemu pro zvýšení axiální únosnosti a tuhosti. Pro použití ve vřetenících se používá řad s menšími výrobními tolerancemi, pro dosažení větších přesností při obrábění. Díky bodovému styku jsou tišší a způsobují menší oteplení než ložiska válečková s čárovým stykem. Konstrukce bývá rozebíratelná na vnější a vnitřní kroužek a klec s valivými elementy.[3]



Obr. 2) Uspořádání kosoúhlých ložisek zleva do „X“ do „O“ a do tandemu[3]

### 2.2.1.2 Válečková ložiska

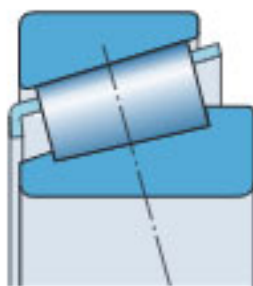
Díky své konstrukci mohou přenášet pouze radiální síly, zpravidla bývají rozebíratelné, kde vnitřní kroužek s valivými elementy a klecí jsou jedna část a vnější kroužek druhá. Díky této konstrukci se používá pro kompenzaci tepelných dilatací způsobených provozem stroje. Vnější kroužek se může vůči elementům a vnitřnímu kroužku mírně pohybovat v axiálním směru. Ložisko se ukládá na válcovou hřídel nebo na kuželovou část hřídele se stoupáním 1:12. Vymezení vůlí se provádí nalisováním ložiska na kuželovou hřídel tak, aby se opřelo o lícovaný distanční kroužek, tím se ložisko předepne a dojde k vymezení vůlí mezi valivými elementy a kroužky ložiska a tím může být dosaženo větší přesnosti a tuhosti. Válečková ložiska dosahují velké radiální únosnosti. Pro její zvýšení se využívá dvouřadých válečkových ložisek nebo ložisek s keramickými válečky.[3]



Obr. 3) Válečkové jednořadé ložisko (vlevo), válečkové dvouřadé ložisko (vpravo)[3]

### 2.2.1.3 Kuželíková ložiska

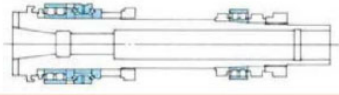
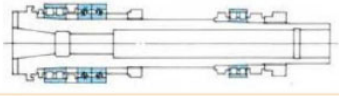
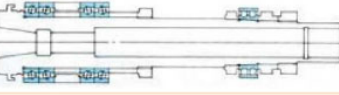


Používají se pro vřeteníky s velkou tuhostí a přesností za cenu snížených maximálních otáček a větších rozměrů. Jako ložiska s kosoúhlým stykem mohou přenášet axiální síly pouze v jednom směru, proto se používají v sestavách, což umožňuje přenášet axiální síly v obou směrech. Stejně jako válečková ložiska jsou rozebíratelná, ale valivé elementy jsou ve tvaru kužele.[4]



Obr. 4) Profil kuželíkového ložiska[4]

## 2.2.2 Uspořádání ložisek

Vřetena musí snášet axiální i radiální síly, ohybové momenty, vibrace atd., proto se volí kombinace ložisek, která tyto vnější působení nejlépe snáší, mají největší tuhost a dosahují nejvyšších pracovních otáček, a také podle požadavků na konkrétní vřeteno.[1]

Typ	Uspořádání ložisek	Charakteristika [%]					Užití
		Axiální tuhost	Radiální tuhost	Otáčky	Přesnost	Radiální zatížení	
I.		100	100	100	100	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• soustruhy</li> <li>• frézky</li> <li>• vrtačky</li> <li>• obráběcí centra</li> </ul>
		66	100	118	100	100	
II.		57	85	155	160	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• soustruhy</li> <li>• frézky</li> <li>• obráběcí centra</li> </ul>
		81	58	155	160	110	
		81	66	180	160	100	

Obr. 5) Uspořádání ložisek a jejich vlastnosti [1]

Nejčastěji používanými kombinacemi uspořádání ložisek pro vřetena frézovacích strojů je kombinace kosoúhlých ložisek do „O“ v části u nástroje s válečkovým ložiskem v zadní části nebo v přední i zadní části uložení do „O“. K těmto uspořádáním se často přidávají dodatečná ložiska pro zlepšení tuhosti a přesnosti, jako například uspořádání TBT atd.

Při použití sad ložisek s kosoúhlým stykem v přední části frézovacího vřetene a válečkových ložisek v zadní části docílíme vřetena s vysokými pracovními otáčkami a velkou přesností za cenu nižší radiální a axiální tuhosti.

Při použití jedné sady ložisek s kosoúhlým stykem v kombinaci s válečkovým ložiskem v přední části docílíme vřetene s dobrou radiální tuhosti a vyšších maximálních otáček vřetene. Za cenu větší zástavbové plochy.

Další kombinace ložisek se používají na vřetenících určených především pro jiné technologie obrábění. [3; 1]

### 2.2.3 Mazání ložisek vřetene

K mazání ložisek se za běžných podmínek používá olej nebo plastické mazivo. Při rozhodování o druhu maziva a způsobu mazání je nutné zohlednit provozní podmínky, charakteristické vlastnosti použitého maziva, konstrukci zařízení a hospodárnost jeho provozu. Mazání olejem nabízí lepší mazání ložiska, odvod tepla a díky tomu vyšší provozní rychlosti. Používají se minerální oleje, které mohou být obohaceny o další přísady. Důležitým parametrem při volbě oleje je provozní teplota a režim mazání.

Hlavní režimy mazání jsou mazání olejovou lázní, vstřikováním, rozstříkem, olejovou mlhou a systémem olej vzduch. Každý režim mazání má své výhody a nevýhody, proto jejich použití závisí především na aplikaci ložiska.

Mazání plastickým mazivem umožňuje snadnější konstrukci a údržbu. Plastická maziva na rozdíl od oleje neodvádí teplo z ložiska a snižují maximální otáčky ložiska. Plastická maziva se skládají ze základového oleje zahuštěného zahušťovadlem a aditivy, které zlepšují vlastnosti maziva, například korozní inhibitory a antioxidanty. [5; 5; 3]

Tab 1) Výpis vlastností jednotlivých způsobů mazání

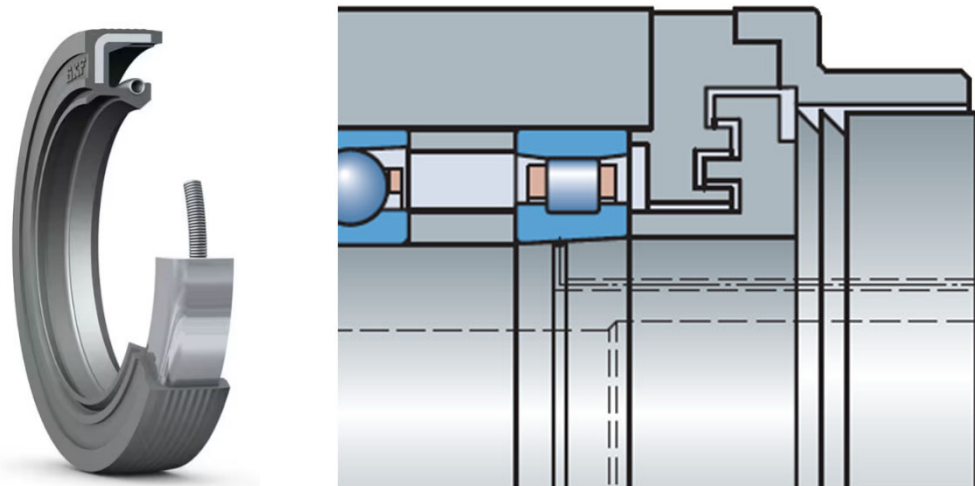
Plastické mazivo	Olej
Provoz při nízkých až středních teplotách	Provoz při vysokých až extrémně nízkých teplotách
Snížení frekvence otáčení (na 65-85%)	Vysoké frekvence otáčení
Ochrana proti vniknutí nečistot	Těsnění proti úniku oleje
Bezúdržbový provoz	Centrální zdroj oleje
Slabé chlazení	Odvod tepla z ložiska
Nemožné odstranění částic z maziva	Snadné odstranění velkých částic z oleje (filtrace)

#### 2.2.4 Zatěsnění ložisek

Těsnění zamezuje vniknutí nečistot, chladicí kapaliny a dalších nežádoucích elementů do vnitřních prostorů vřeteníku a ložisek. Používá se dvou typů těsnění: kontaktní a bezkontaktní.

Kontaktní těsnění mají lepší těsnicí vlastnosti, ovšem při vyšších obvodových rychlostech může docházet ke generování tepla a zhoršení účinnosti soustavy. Pro nejvyšší účinnost je nutné kontrolovat řadu proměnných, jako je materiály stykové dvojce, kvalita povrchu, přítomnost maziva atd. Využívá se Gufer nebo V-kroužků.

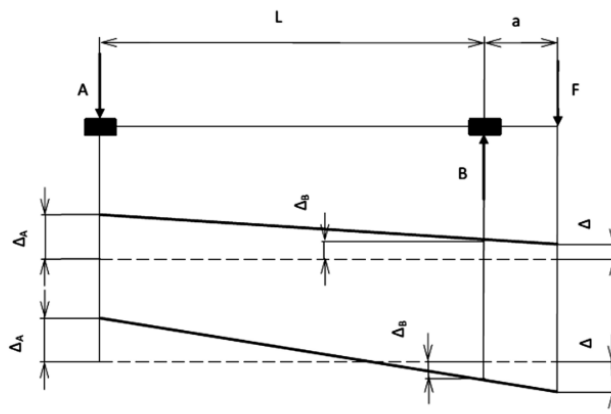
Při použití bezkontaktních těsnění nedochází ke kontaktu dvou rotujících částí, tudíž nedochází ani ke generování tepla. Fungují na principu úzkých spár s ostrými hranami a pravými úhly. Díky tomu jakákoliv nečistota zvenčí nebo provozní media zevnitř neprojdou tímto labyrintem. Velikost mezery mezi jednotlivými díly je 0,1-0,2mm. Nevýhodou je složitost labyrintových prvků potřebných pro dosažení zatěsnění s vlastnostmi jako s kontaktním těsněním, to má za následek složitější výrobu a větší plochu zástavy. Používá se především u přesných aplikací s vysokými otáčkami. [3]



Obr. 6) Gufero (vlevo), bezkontaktní těsnění labyrintem (vpravo)[3]

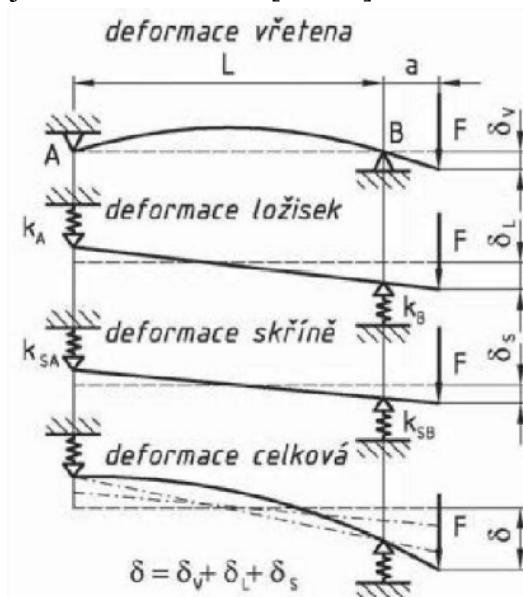
### 2.3 Přesnost/tuhost vřetene

Přesnost vřetena se kontroluje na předním konci na ploše, která má přímý vliv na přesnost otáčení nástroje. Největší vliv na přesnost má přesnost ložisek a jejich uložení. Nepřesnost způsobuje radiální házení u ložisek a je závislé na poměru délky vyložení a na ložiskové vzdálenosti. Celkové házení se násobí, pokud je házení ložisek opačného směru. Proto je v praxi vhodné montovat ložiska tak, aby házela ve stejné rovině (Obr. 7). Dále může radiální házení způsobovat nedokonalá kruhovitost plochy nebo nesouosost plochy s plochou, na které měříme s osou otáčení. Axiální házení způsobují ložiska pohlcující axiální zatížení, případně nedokonalou kolmostí čelní plochy k ose otáčení. Měří se na čelní ploše vřetena.[1]



Obr. 7) Sčítání házení ložisek na čele vřetena[1]

Tuhost vřetene má vliv jak na přesnost práce pod zatížením, tak i na dynamickou stabilitu stroje, udává se na jeho přední části. Celková deformace se skládá ze součtu deformací vřetena, ložisek a skříně (Obr. 8). Ložiska se v modelu nahrazují pružinou o tuhosti dodané výrobcem, stejně tak tuhost skříně, ale ta se musí spočítat pomocí MKP. Tuhost vřetene lze spočítat pro konkrétní podmínky a zjistit pro ně deformace. Při počítání tuhosti vřetene předpokládáme, že ložiska jsou dokonale tuhá. [6; 6; 1]



Obr. 8) Tuhosti jednotlivých komponent vřetene[1]

Přesnost radiální a axiální společně se statickou a dynamickou tuhostí a teplotními vlastnostmi udává pracovní přesnost, která je hlavní ukazatel kvality stroje. Výpočet je tak komplexní, že v dnešní době se provádí MKP a analyticky pouze zkontrolujeme vybrané uzly a podmínky, abychom si ověřili, zda nedošlo k chybě při určování modelů a okrajových podmínek MKP.

## 2.4 Pohon vřetene

Pohon zajišťuje dodání potřebného řezného výkonu k nástroji, proto se využívají synchronní a asynchronní servomotory. Motor je s vřetenem spojen buď přímo nebo nepřímo pomocí vloženého převodu (ozubené kolo, řemen).[1]

### 2.4.1 Příímý náhon

Motor je buď připevněn externě k vřeteníku a hřídel motoru je s vřetenem spojena spojkou, nebo je elektromotor vestavěn přímo do vřeteníku a rotorem je vřeteno, potom se vřetenu říká elektrovřeteno. Obě řešení mají vysokou účinnost a dobrou reakci na změnu otáček. Externě upevněný motor lze lehce při servisu vyměnit, teplo je generováno mimo vřeteník, tudíž není nutné aktivní chlazení. Nevýhodou je přenos vibrací na všechny členy sestavy a složitější řešení automatické výměny nástroje.

Elektrovřeteno úzce integrováno do konstrukce vřeteníku má za následek nižší kvadratické momenty, elektrovřeteno také dobře reaguje na změny otáček, má vynikající účinnost a může dosahovat vysokých provozních otáček. Nevýhodou je generování tepla uvnitř vřeteníku, tudíž je za potřeby aktivního chlazení, dále je také obtížnější údržba a výměna jednotlivých dílů elektromotoru.[1]



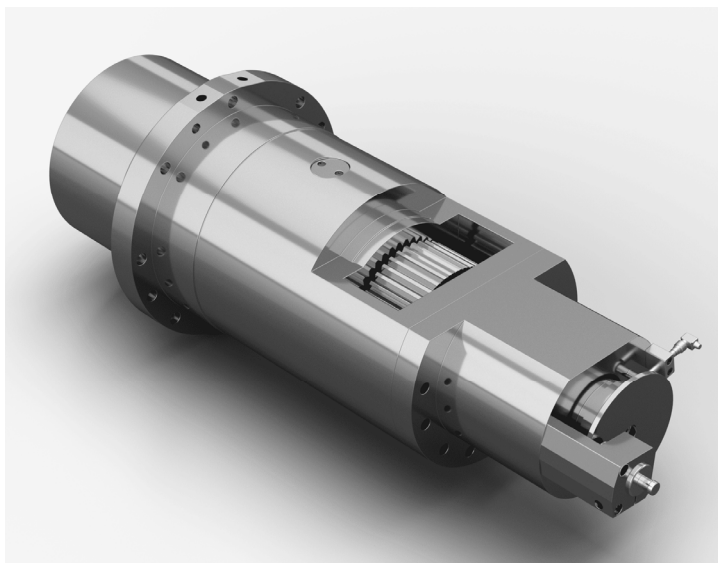
Obr. 9) Stator a rotor vestavěného elektromotoru[7]

## 2.4.2 Nepřímý náhon

Motor je připevněn mimo osu otáčení vřetene, řezný výkon je přenášen na vřeteno vloženým převodem, buď ozubeným kolem(převodovkou) nebo řemenovým převodem.

U převodu ozubeným kolem/převodovkou lze přenášet vysoké kroutící momenty a lze vložit převodovku s řazením, nevýhodou je nutnost vymezování vůlí v převodech, vytváření vibrací a ztráta účinnosti s každým vloženým převodem.

U převodu řemenem naopak při přenosu větších kroutících momentů pomocí klínového řemenu může dojít k prokluzu a ztrátě účinnosti, naopak nedochází k přenosu vibrací a převod je hladký. Aby nedocházelo k prokluzu používá se ozubených řemenů. Prokluz u klínového řemene může sloužit jako pojistka proti přetížení.[1]

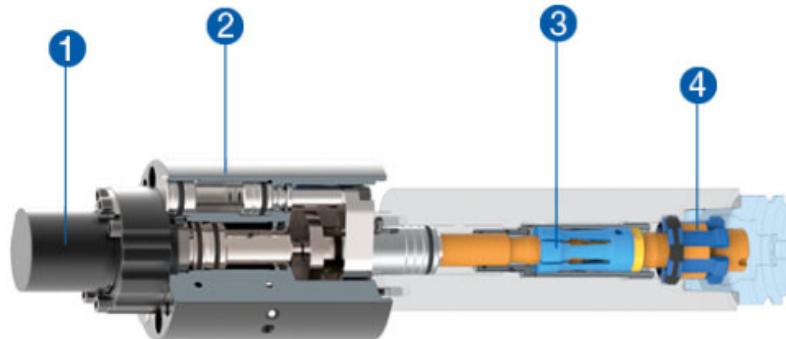


Obr. 10) Vřeteno řady BELT-M s náhonem přes řemen od firmy Omlat[8]

## 2.5 Systémy upnutí nástroje

Pro dosažení požadované přesnosti a tuhosti musí být přesně a pevně upnut i nástroj, proto existuje celá řada upínacích systémů, konceptů upínání lišících se tvary a počtem upínacích ploch. Kvůli vysokým nárokům na přesnost kontaktních ploch mezi upínacími kleštinami na vřetenu a protikusem držící nástroj se upínací systém pořizuje jako funkční celek. Ve vřetenu je potřeba vyrobít dutinu a jednoduché, ale přesné dosedací plochy, do kterých je kupovaný systém namontován. Hlavními parametry těchto systémů je tuhost, přenos kroutícího momentu, možnost automatické výměny nástrojů, hmotnost, počet stykových ploch, radiální házení.[9][1]

Celek upínacího systému se skládá z 1) Rotačního převodníku, který umožňuje přenos medií (stlačený vzduch a chladicí médium) mezi rotující a stacionární částí vřeteníku, 2) Hydraulického pístu, který odepíná a upíná nástroj 3) Pružiny s táhlem zajišťující upnutí převodníku, a to i při výpadku dodávky hydraulického oleje, 4) Upínací kleštiny [10]



Obr. 11) Hlavní části upínacího systémů nástrojů[10]

### 2.5.1 ISO kužel/BIG-PLUS

Kužel kuželovitostí 7:24, patří mezi nejrozšířenější a nejstarší standardy. Vyznačuje se dlouhým tělem s upínacím čepem, proto je pro automatickou výměnu potřeba větší vzdálenosti posuvu výměníku v ose nástroje. Dosedá do vřetene pouze jednou plochou, z toho důvodu není příliš tuhý při působení ohybových momentů. Další nevýhodou je omezení maximálních otáček z důvodu velké hmotnosti kužele a způsobu konstrukce upínacích kleštin. Z kužele 7:24 vzešlo mnoho dalších odvozených standardů, jako americký CAT-V a asijský MAS-BT a BIG-PLUS. BIG-PLUS se od ISO kužele liší dodatečnou dosedací plochou na čele kužele. Díky tomu má vyšší tuhost při zatížení ohybových momentů, mimo to trpí stejnými nedostatky jako klasický ISO kužel. [9]



Obr. 12) ISO kužel určený pro automatický výměník [11]

## 2.5.2 HSK

Standard vyvinutý německým normalizačním úřadem přímo pro použití v CNC obráběcích centrech disponuje dvěma stykovými plochami, jednou na kuželu 1:10 a druhou z čela kužele. Díky tomu má větší tuhost a může přenášet vyšší ohybové momenty, dále díky způsobu upnutí a menší hmotnosti může dosáhnout vyšších provozních otáček. Podle způsobu využití se dělí na typy A-F a T.[9]

Typ A: Obecné využití, vysoké ohybové zatížení a střední momenty, vhodné pro automatickou výměnu nástroje.

Typ B: Využití pro statické operace, střední ohybové zatížení a vysoké momenty, vhodné pro automatickou výměnu nástroje.

Typ C: Obecné využití, vysoké ohybové momenty a střední kroutící momenty, určené pro ruční výměnu nástroje.

Typ D: Využití pro statické operace, střední ohybové zatížení a vysoké momenty, určené pro ruční výměnu nástroje.

Typ E: Využití pro vysokorychlostní operace u lehkých a vysokootáčkových vřeten, nízké ohybové a kroutící momenty, jednoduché vyvážení, vhodné pro automatickou výměnu nástroje.

Typ F: Využití pro operace se střední rychlostí obrábění, určené pro měkké materiály, střední ohybové a kroutící momenty, jednoduché vyvážení, vhodné pro automatickou výměnu nástroje.

Typ T: Určené pro rotační a statické aplikace, s nízkými tolerancemi v poziční drážce pro zaaretování nástroje.



Obr. 13) Upínací kužel HSK typ A [12]

### 2.5.3 Coromant Capto

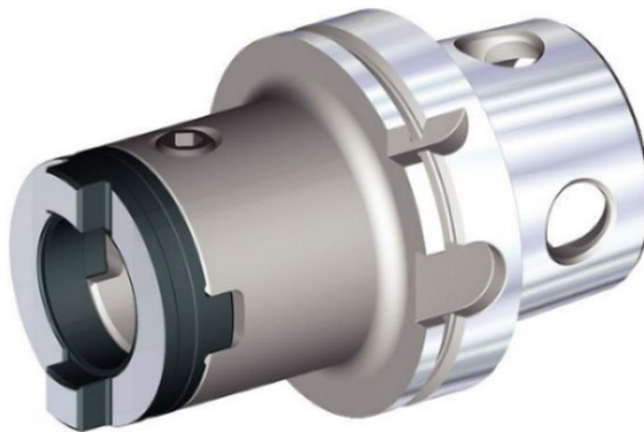
Vyvinut společností Sandvik Coromant. Hned od počátku vývoje systému se počítalo s rotační i statickou aplikací. Místo kužele využívá skoseného polygonu, proto není nutné použití drážky pro přenášení kroutících momentů. Disponuje dvěma styčnými plochami, plocha polygonu a jeho čelo. Je vhodný pro multifukční zařízení, pro statické (soustružnické) operace, tak i pro rotační (frézovací a vrtací) operace.[9]



Obr. 14) Upínací systém Coromant Capto [9]

### 2.5.4 KMTS/KM4X

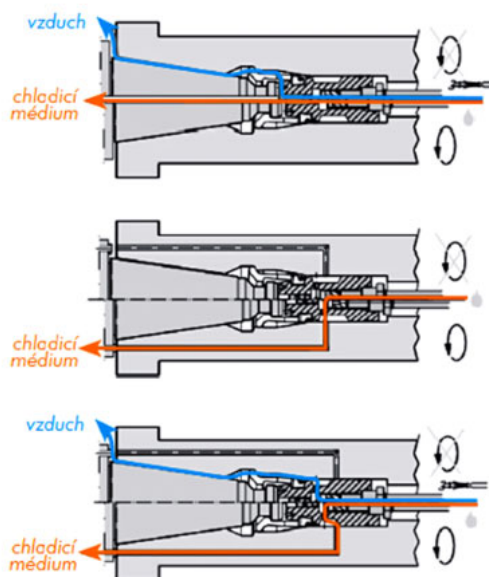
Vyvinutý firmou Kennametal, se třemi kontaktními plochami, dvě na kuželové ploše, která je rozdělená a jednou z čela. Pro přenos kroutícího momentu využívá pouze třecích sil díky vysoké upínací síle. Disponuje vysokou tuhostí a dokáže přenášet vysoké kroutící momenty.



Obr. 15) Upínací systém KM4X [13]

## 2.6 Přívod chladicí kapaliny/vzduchu

Chladicí kapalina odvádí z místa řezu teplo a třísky a také maže nástroj, díky tomu prodlužuje životnost nástroje. Dříve nebylo chlazení primární funkcí stroje a vedení bylo děláno druhořadě. Dnes se chlazení považuje za samozřejmost. Chladicí kanálky jsou vedeny středem nástroje, aby byla kapalina dodána co nejvíce do řezu. Při výměně nástroje stlačený vzduch očistí stykové plochy od třísek a dalších nečistot.[1]



Obr. 16) Vedení médií vřetenem a držákem nástroje [1]

## 2.7 Diagnostické prvky

Vřeteník může být osazen sadou senzorů, které monitorují jeho jednotlivé funkce. Díky tomu lze hlídat výrobní proces a dosáhnout vyšší kvality výroby. Nejčastěji se používají senzory vibrací (akcelerometry), teploty a polohy (hallové senzory) a průtoku. Analýzou dat ze senzorů můžeme předvídat technický stav prvků vřeteně a předejít tak poruchám při provozu.[2]

- Vibrační senzor, monitorující stav ložisek uložení, nevyvážení nástroje a změny v procesu obrábění způsobené změnou stavu nástroje při obrábění. [14]
- Analogový senzor polohy upínání a uvolňování nástrojů, který snímá pouze polohu upínacího táhla, nezaručuje funkci upínacího mechanismu.
- Kontrola celkového axiálního posunutí pomocí snímače vířivých proudů v elektrovřetení.
- Stav polohy upínacího pístu, pouze poloha upnuto/uvolněno
- Přímá kontrola upnutí nástrojového držáku ve vřeteně
- Senzor těsnosti a prosaku hydraulického obvodu
- Senzor teploty elektrovřeteně monitoruje teplotu motoru, ložisek a oleje.
- Senzor průtoku zjišťuje, zda je dodáváno dostatečné množství pracovních médií a zda nedochází k jejich úniku.
- Senzor čistoty dotykových ploch nástroje a vřeteně, na čele příruby jsou umístěny senzory, které jsou schopny rozlišovat po obvodu statické nečistoty v průběhu upínacího cyklu. V případě výskytu nečistot se upínací a čistící cyklus opakuje.

## 2.8 Dostupná řešení na trhu

Výrobci elektrovřeten pružně reagují na současné požadavky trhu obráběcích strojů, to se projevuje širokou škálou dostupných otáčkových a výkonových parametrů, modulárních provedení. Další vývoj probíhá v jednoduchosti a rychlosti servisních zásahů díky uspořádání zástavbového prostoru. To má za následek vytlačování klasických náhonů vřeteníků realizovaných motorem s převodem.

### 2.8.1 Kessler řada V100

Tradiční výrobce elektrovřetene je firma Kessler, která reaguje na požadavky trhu a zákazníků. Představitelem nejmodernějšího provedení je řada elektrovřeten V100. V nabídce jsou čtyři typy rozdělené dle udávaného výkonu. Toto provedení se vyznačuje modulárností, kdy základní jednotka je připravena pro všechny dodatečné montáže čidel a senzorů u zákazníka. Tím je zaručená možnost dodatečně zajistit požadavky zákazníků sensorovým vybavením.

Dále se toto řešení vyznačuje možností demontáže pouze vřetene s uložením po uvolnění čelní příruby. Celé těleso se statorem včetně připojení médií zůstane namontováno na stroji zákazníka. Tím jsou velice zjednodušeny a zrychleny servisní úkony u zákazníka. Modulární provedení elektrovřetena umožňuje zákazníkům do stejného zastavěného prostoru použít až čtyři výkonové a otáčkové řady (od 15–50 kW a 14 000–24 000 min<sup>-1</sup>)[2]



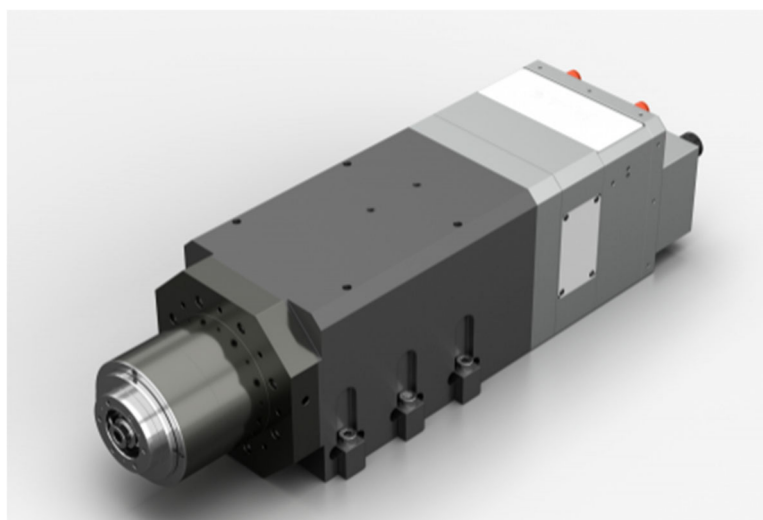
Obr. 17) Elektrovřeteno Kessler řada V100 [2]

Zhodnocení vřeten

### 2.8.2 Omlat řada DELTA

Firma Omlat nabízí širokou škálu provedení vřeten pro různé oblasti průmyslu. Jedná se například o skříňové provedení elektrovřeten, které najde uplatnění v samostatných jednotkách více-vřetenových jednoúčelových strojů, upnutí je provedeno pomocí plochých stykových ploch a geometrie je nastavena následným ustavením vřetene. Dále nabízí samostatná uložení pouze vřetenových jednotek s náhonem přes převod, v nabídce jsou také vřetenové hlavy a elektrovřetena. Kromě uložení vřeten ve valivých ložiskách firma nabízí hydrostatické uložení vřeten, které disponují větší tuhostí uložení.

Vřetena řady Delta je možné osadit senzory vibrací, monitorující stav ložisek uložení, nevyvážení nástroje a změna v procesu obrábění způsobených změnou stavu nástroje při obrábění a senzorem prodloužení, monitoruje teplotní dilatace vřetena způsobené ohřevem při obrábění. [8]



Obr. 18) Skříňové elektrovřeteno Omlat Delta 12 [8]

### 2.8.3 NSK W-B

Firma NSK vyrábí mimo jiné i ložiska pro vřetena, mazací systémy a těsnění. Integruje tudíž vlastní produkty do svých vřetene a vytváří tím ucelený kompaktní produkt s velkým množstvím vlastních komponentů. Její vřetena jsou upravitelná dle požadavků zákazníku, ať už se jedná o výkon, upnutí a chlazení nástroje či mazání ložisek. Nabízí vřetena v rozmezí 15 000 – 20 000 min<sup>-1</sup> a výkonu 11–18 kW. NSK nabízí upnutí nástrojů HSK – A63 nebo BT40. Mazání je řešeno náplní plastického maziva po určitou životnost nebo systémem s automatickým domazáváním ložisek mazivem. [15]

## 2.8.4 Výstup z rešerše a srovnání vřeten

Tab 2) Parametry vřeten

	Kessler V100	Omlat Delta 12	NSK W-B 1100-030330
Otáčky	14 000	24 000	15 000
Moment	80	10	60
Výkon	15	12	11
Mazání	Plastické mazivo	Plastické mazivo	Plastické mazivo
Upínání nástroje	HSK – A63	HSK – F63	HSK – A63

Z rešerše vyplývá že nejvhodnější a zároveň nejpoužívanější variantou uložení bude uložení do „O“ s přidáním ložiska do tandemu v případě potřeby vyšší únosnosti a v zadní části s válečkovým ložiskem. S využitím moderních plastických maziv není nutné předpokládat snížení životnosti ložisek, plastické mazivo je tudíž hojně používané v oblasti vřeten obráběcích stroj, tudíž použito i v řešení této práce.

Na trhu jsou dostupná vřetena s vysokým rozpětím otáček a momentů, často i ve stejné produktové řadě, výběr tedy závisí čistě na předpokládaných použitích vřetene. Z rešerše je zřejmé že oblastí současného vývoje je sensorika vřetena, firmy vybavují dle žádosti zákazníku vřetena více a více diagnostickými prvky na kontrolu co nejvíce parametrů výroby a provozu. Je také zřejmé že vřetena podobného výkonu jako je určené v zadání diplomové práce používají HSK upínání o velikosti 63. Další prvky vřetene jako otáčky, moment a další parametry vyjdou z návrhu technologických operací.

## 3 KONCEPCE NAVRHOVANÉHO VŘETENE

### 3.1 Požadavky na vřeteno

Zadání diplomové práce je velmi obecné, což umožňuje volnost při volbě koncepce vřetena. Jediné požadavky vycházející ze zadání jsou: výkon vřetene 10 kW, zastavená konstrukce a automatická výměna nástrojů HSK. Ostatní požadavky a podmínky budou určeny v této kapitole.

Obecně se konstrukce vřeten odvíjí od způsobu předpokládaného použití a stroje, na kterém budou instalovány. Proto je na trhu dostupné obrovské množství vřeten různých konstrukcí a parametrů. Pro náš případ budeme uvažovat následující využití.

Vřeteno bude využíváno na běžné obráběcí operace v průběhu celého technologického procesu. To znamená: hrubovací frézování, dokončovací frézování, vrtání a ostatní operace jako závitování, srážení hran atd. Dále se předpokládá, že se vřeteno bude využívat ve dvousměnném osmihodinovém provozu. Z toho důvodu bude požadováno alespoň 25 000hod životnost ložisek.

Jako primární obráběný materiál budeme uvažovat ČSN 14 220 (16MnCr5). Jedná se o hojně používaný materiál napříč odvětvími s velkou řadou využití.

Tab 3) Vlastnosti obráběného materiálu [16]

Parametr		Hodnota	Jednotka
Mez kluzu	Re	420	MPa
Mez pevnosti	Rm	550	MPa
Tvrдость HB	HB	207	-

Z volby materiálu a předpokládaných technologických operací vyplývá, že na vřeteno budou kladeny vysoké požadavky na tuhost, životnost a přesnost. Od toho se bude odvíjet volba ložisek a jejich uspořádání.

Požadavkem každého zákazníka je také co nejmenší nutnost údržby, tudíž jedním z požadavků bude i provoz po dobu alespoň 25 000hod s určenými servisovacími intervaly. Vřeteno se výkonem řadí do kategorie menších obráběcích strojů, tudíž dalším z požadavků bude co možná nejmenší zastavěný prostor vřetenem, aby bylo možné vřeteno instalovat do co nejširšího sortimentu odpovídajících obráběcích strojů.

## 3.2 Konstrukční koncepce

Z důvodu obecného zadání diplomové práce lze pojmout konstrukci vřetene velkým počtem koncepčních řešení. Všechny následující koncepční řešení splňují požadavky vycházející ze zadání diplomové práce. Tyto a další parametry budou hodnoceny multikriteriální analýzou. Na základě součtu hodnocení bude vybráno nejvhodnější řešení, které bude dále rozpracováno. Navržená koncepční řešení vychází z rešerše a průzkumu trhu.

### 3.2.1 S přímým náhonem

Jedná se o vřeteno s přímým náhonem, tzn. elektromotor je v ose otáčení vřetene a je spojen s vřetenem spojkou. Vřeteno je uloženo zvlášť v ložiskové přírubě, které je pevně spojeno se skříní vřeteníku a elektromotor je přišroubován ke skříní vřeteníku ze zadní strany. Spojka je uložena mezi motorovou částí a vřetenovou částí. Toto řešení je výhodné při modernizaci starších strojů, kdy do původního mechanického provedení stroje se zabuduje vřeteno s přímým náhonem.



Obr. 19) Vřeteno s přímým náhonem přes spojku[17]

### 3.2.2 S vloženou převodovkou

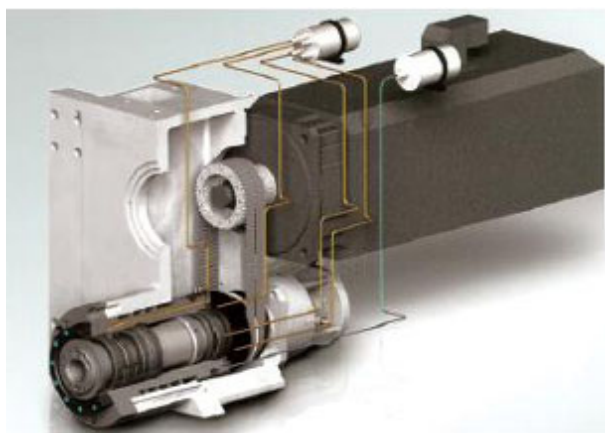
Jedná se o zvláštní typ elektrovřetene tubusového provedení, kde elektromotor, převodovka a vřeteno jsou v jedné zástavbě. Vřetenová, převodovková a motorová část tvoří každá samostatný kompaktní celek. Všechny tři skupiny jsou vzájemně propojeny a uloženy ve společném vnější plášti, přes který jsou realizovány všechny přívody médií, které jsou vyvedeny na jednotné zadní rozhraní. Toto řešení je výhodné pro realizaci pinolového provedení strojů. Toto provedení s vestavěnou dvoustupňovou převodovkou svými parametry se blíží standartním strojům (vyšší moment a nižší otáčky)



Obr. 20) Vřeteno s vloženým převodem DESCH Denox HS[18]

### 3.2.3 S vloženým převodem

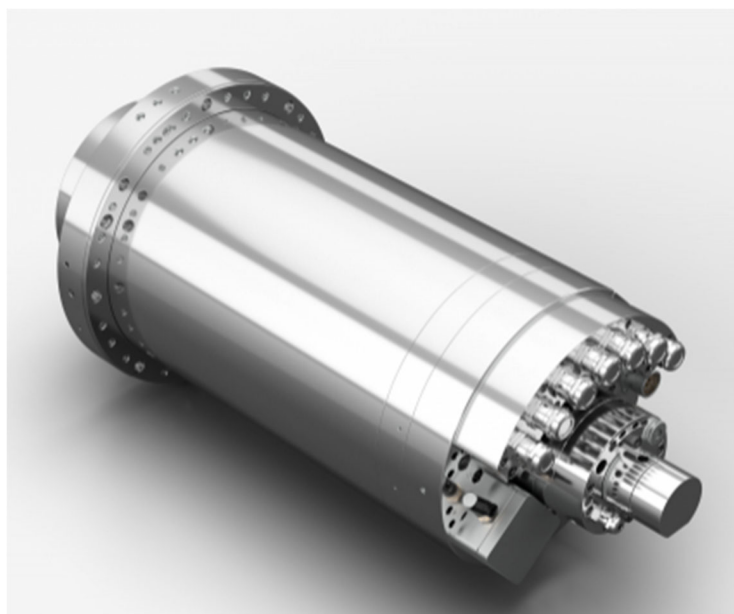
Jedná se o vřeteno s nepřímým náhonem, kde motor je umístěn rovnoběžně s osou vřetene, ale není ve stejné ose. Vřeteno je uloženo ve vřeteníkové skříni a v zadní části se nachází řemenice pro řemenový převod, který spojuje vřeteník s elektromotorem. Elektromotor je přišroubován k straně vřeteníku. Toto řešení je vhodné pro retrofit starších frézovacích strojů (vyvrtávačky, frézky), při využití původního vřeteníku stroje s minimálními úpravami. Náhon s vestavěným konstantním převodem umožňuje, buď přiblížit se provedení v oblasti momentové charakteristiky, anebo posunout parametry stroje do oblasti rychlostního obrábění.



Obr. 21) Vřeteno s řemenovým převodem [1]

### 3.2.4 Elektrovřeteno

Jedná se o klasickou tubusovou konstrukci elektrovřetene, kde součástí vřetene je vestavěný elektromotor. Tato vřetena splňují požadavky pro vysokorychlostní obrábění. V této oblasti je vysoká konkurence nabízených řešení od různých firem. Pro správný chod každý výrobce přesně specifikuje způsob zatížení, využití a požadavků na všechna přiváděná média. Konkurence se liší senzorovou výbavou.



Obr. 22) Elektrovřeteno Omlat OMC, zadní připojovací rozhraní [19]

### 3.2.5 Hodnocení koncepcí

Hodnocení probíhá přiřazením bodového hodnocení (1-3) k jednotlivým kritériím o určité váze podle jejich důležitosti (1-5) a následném sečtení výsledných bodů jednotlivých koncepčních variant. Hodnocení variant bude probíhat podle informací získaných v rešerši v kombinaci s odporným odhadem. Kritéria hodnocení jsou vypsaná v tabulce 3.

Tab 4) Kritéria hodnocení a jejich váha

Kritérium	Váha	1 bod	2 body	3 body
Maximální otáčky	4	Nízké	Střední	Vysoké
Výkonová hustota	4	Nízká	Střední	Vysoká
Tuhost	5	Nízká	Střední	Vysoká
Rozměr zástavby	4	Velký	Střední	Nízký
Servisovatelnost	3	Špatná	Dostačující	Dobrá
Náročnost výroby	2	Náročná	Průměrná	Snadná
Teplotní stabilita	2	Špatná	Dostačující	Dobrá
Cena	2	Vysoká	Střední	Nízká
Hlučnost	2	Hlučný	Hlasitý	Tichý
Přesnost	4	Nízká	Střední	Vysoká
Účinnost	3	Špatná	Dostačující	Dobrá
Čas rozběhu/zabrzdnění	2	Vysoký	Střední	Nízký

Tab 5) Hodnocení jednotlivých koncepčních návrhů

Kapitola		3.2.1	3.2.2	3.2.3	3.2.4
Kritérium	Váha	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Maximální otáčky	4	3	1	2	3
Výkonová hustota	4	3	2	2	3
Tuhost	5	2	2	2	2
Rozměr zástavby	4	1	2	1	3
Servisovatelnost	3	1	1	2	3
Náročnost výroby	2	2	1	3	1
Teplotní stabilita	2	2	2	2	2
Cena	2	2	1	3	2
Hlučnost	2	1	1	2	3
Přesnost	4	2	2	2	3
Účinnost	3	2	1	1	3
Čas rozběhu/zabrzdnění	2	2	1	1	3
<b>Součet:</b>	-	73	56	69	98

Z multikriteriálního hodnocení vyšla jako nejvhodnější čtvrtá koncepce (elektrovřeteno). Dále se bude diplomová práce zabírat konstrukcí elektrovřetene.

## 4 NÁVRH KLÍČOVÝCH UZLŮ

V následující kapitole bude popsán postup volby stěžejních prvků včetně jako je volba elektromotoru, výpočet ložisek a volba jejich uložení atd. Návrh těchto částí probíhá souběžně s konstrukcí a volba jednotlivých prvků ovlivňuje konstrukci a naopak.

### 4.1 Návrh technologických operací

Z požadavků na vřeteno vychází, že hlavní technologické operace budou frézování a vrtání. Životnost ložisek bude proto počítána pro tyto dvě technologické operace zvlášť a u každého výpočtu se bude uvažovat, že daná operace se provádí po celou životnost stroje při maximálním jmenovitém výkonu motoru. Nástroje pro technologie byly vybrány ze sortimentu firmy Sandvik Coromant.

#### 4.1.1 Frézování(hrubování)

Po několika iteracích řezných podmínek, aby potřebný výkon odpovídal zadání diplomové práce, byly z programu ToolGuide od firmy Sandvik Coromant odečteny řezné podmínky (Tab. 6) pro následující nástroj a výměnnou břitovou destičku (Tab. 5).

Tab 6) Frézovací nástroj a VBD [20]

Nástroj	Sandvik Coromant R300-035C3-12H
Destička	Sandvik Coromant R400-1240M-PH-1230

Tab 7) Řezné parametry frézovacího nástroje [20]

Parametr		Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	$V_C$	355	m/min
Posuv na zub	$f$	0,121	Mm
Průměr nástroje	$D_n$	35	Mm
Měrný řezný odpor	$K_C$	3120	N/mm <sup>2</sup>
Hloubka řezu	$a_p$	4	mm

Z těchto parametrů byly vypočítány síly vznikající při obrábění.

#### Řezná síla

Je závislá na posuvu zubu na otáčku a hloubce řezu a měrném řezném odporu, v případě frézování vyvolává radiální zatížení ložisek.

$$F_C = K_C \times a_p \times f \quad (1)$$

Po dosazení

$$F_C = 3120 \times 4 \times 0,121 = 1510 \text{ N} \quad (2)$$

### *Pasivní síla*

Pasivní síla je síla vyvolávaná při obrábění působící kolmo k řezné síle v kolmé rovině k ose otáčení nástroje. Přispívá k radiálnímu zatížení ložisek řeznou silou.

$$F_f = 0,25 \times F_C \quad (3)$$

Po dosazení

$$F_f = 0,25 \times 1510 = 377 \text{ N} \quad (4)$$

### *Axiální síla*

Axiální síla je síla vyvolávaná při obrábění působící kolmo k řezné síle ve směru osy otáčení nástroje. Vyvolává axiální zatížení ložisek.

$$F_p = 0,4 \times F_C \quad (5)$$

Po dosazení

$$F_p = 0,4 \times 1510 = 604 \text{ N} \quad (6)$$

### *Řezný moment*

Řezný moment je moment potřebný pro obrábění danou operací, je závislý na průměru nástroje a řezné síle, nezahrnuje ztráty v soustavě.

$$M_C = \frac{F_C \times D_n}{2} \quad (7)$$

Po dosazení

$$M_C = \frac{1510 \times 35}{2} = 26,426 \text{ Nm} \quad (8)$$

### 4.1.2 Vrtání

Síly vrtání byly počítány pro vrtaný průměr 20 mm s předpokladem, že větší průměry děr by byly primárně frézovány. Do programu ToolGuide od firmy Sandvik Coromant byly zadány parametry ze zadání diplomové práce a po několika iteracích byl zvolen následující nástroj (Tab. 7) s řeznými podmínkami navrženými programem ToolGuide (Tab. 8). Opět uvažujeme, že operace bude probíhat po celou životnost vřetena na maximální jmenovitý výkon motoru.

Tab 8) Vrtací nástroj a VBD [20]

Nástroj	Sandvik Coromant CoroDrill 880-D2000L25-03
Destička	Sandvik Coromant 880-04 03 W07H-P-GR 4334 a 880-04 03 05H-C-LM 1044

Tab 9) Řezné parametry vrtacího nástroje [20]

Parametr		Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	$V_C$	195	m/min
Posuv na otáčku	$f_n$	0,179	Mm
Průměr nástroje	$D_n$	20	Mm
Posuvná síla	$F_P$	2470	N
Otáčky	$n_v$	3400	min <sup>-1</sup>
Řezný moment	$M_k$	26,2	Nm

### 4.1.3 Moment potřebný pro obrábění

Veškerý moment vyvíjený elektromotorem není využit pro obrábění, část je převedena na teplo díky ztrátám v soustavě, především v podobě tření v ložiskách. Proto musí být ztráty zahrnuty ve výpočtu návrhu elektromotoru. Hodnoty účinnosti ložisek byly odečteny z příručky SKF.

*Účinnost ložiska s kosouhlým stykem*

$$\eta_{kos} = 0,99 \quad (9)$$

*Účinnost válečkového ložiska*

$$\eta_{val} = 0,98 \quad (10)$$

*Celková účinnost*

Účinnost více prvků v soustavě se nesčítá, ale násobí, tudíž násobíme účinnost kosouhlého ložiska třikrát a válečkového pouze jednou.

$$\eta_C = \eta_{kos}^3 \times \eta_{val} \quad (11)$$

Po dosazení

$$\eta_C = 0,99^3 \times 0,98 = 0,9509 \quad (12)$$

*Výkon motoru*

Pomocí celkové účinnosti a řezného momentu vypočítáme potřebný kroutící moment elektromotoru pro obráběcí operace.

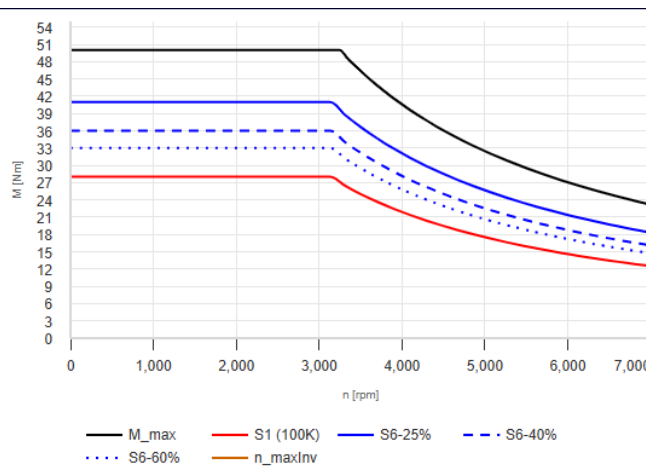
$$M_m = \frac{M_C}{\eta_C} = \frac{26,426}{0,9509} = 27,79 \text{ Nm} \quad (13)$$

## 4.2 Návrh elektromotoru

Dle zadání a z parametrů získaných při výpočtu sil vzniklých při obrábění byl zvolen elektromotor. Elektromotor musí mít dle zadání výkon 10kW, dále musí být schopen kontinuálně dodávat kroutící moment potřebný pro obrábění 27Nm za konstantních požadovaných otáček 3500 min<sup>-1</sup>. Uvažujeme možný nepřetržitý provoz hrubovací frézovací operace po celou dobu životnosti včetně. (včetně je konstruováno na specifické požadavky, není určeno pro sériovou výrobu, proto S1)

Před konečnou volbou elektromotoru byl proveden počet iterací technologií obrábění dle dostupných elektromotorů na trhu. Nakonec byl zvolen motor od firmy Siemens SIMOTICS M-1FE1091-6WN10-6BC0, jedná se o vysoko momentový synchronní vestavěný motor pro elektrovřetená o průměru 205 mm a délce 150 mm a průměru pro vřetená 67 mm.

Konstrukce motoru je koncipovaná tak, že rotor je nasunut na hřídel (vřetená) s přesně obrobenými kontaktními plochami dle dokumentace od výrobce a pomocí tepelné dilatace nasunut na vřetená, po ochlazení svěrným spojem pevně spojen s vřetenem. Stator je pomocí šroubů na čele uchycen ke konstrukci vřeteníku, na vnějším průměru je spirálová drážka pro chlazení motoru vodou, proto je přes motor nasunut návlek, který slouží jako konstrukční část vřeteníku a zároveň rozvádí chodící médium pro motor. Motor je vybaven teplotním senzorem Pt1000, jako ochrana proti přehřátí motoru. Vývod napájecích kabelů a kabelů senzoru je proveden u vnějšího průměru statoru na upínacím čele.



Obr. 23) Momentová charakteristika zvoleného motoru [7]

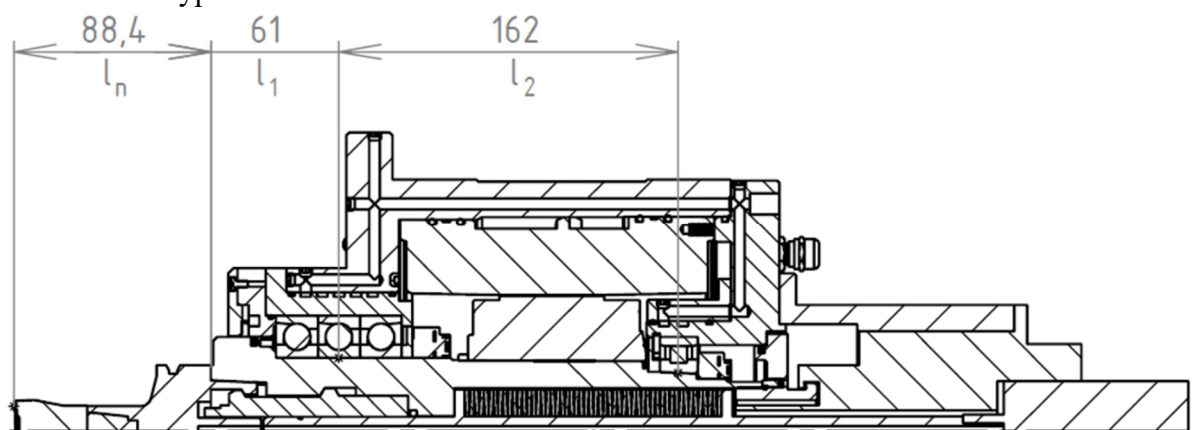
Tab 10) Parametry zvoleného motoru [7]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	10	kW
Moment	28	Nm
Jmenovité otáčky	3500	n <sub>n</sub>
Maximální otáčky	7000	n <sub>max</sub>
Vnější průměr	205	mm
Délka	150	mm
Průměr hřídele pro rotor	67	mm

### 4.3 Reakční síly

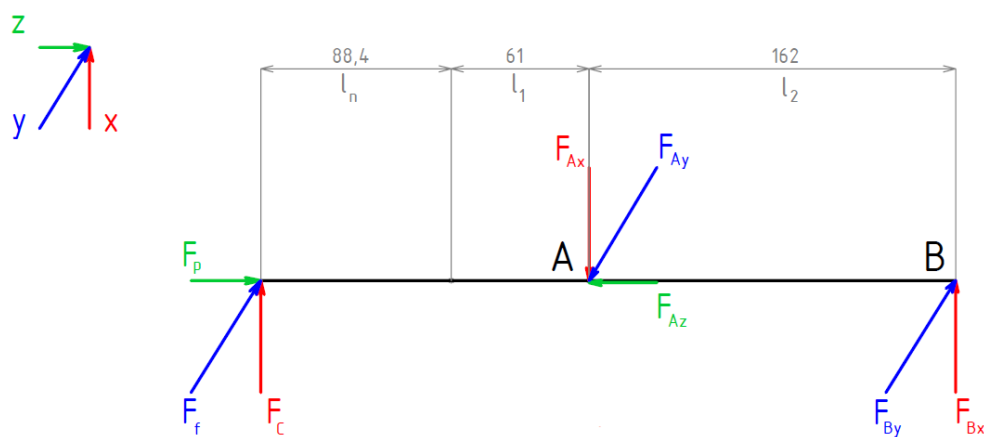
Reakční síly jsou stěžejní pro dimenzování ložisek. Vzdálenosti mezi ložisky a zdroje zatížení vzešly z konstrukční části práce. Hodnota  $l_n$  je vzdálenost mezi čelem vřetene a působištěm řezné síly při frézování. Hodnota  $l_1$  je vzdálenost mezi středem předního uložení a čelem vřetene. Hodnota  $l_2$  je vzdálenost mezi středem předního uložení a středem válečkového ložiska.

Z těchto rozměrů a sil vznikajících při obrábění (řezná síla, pasivní síla a axiální síla) spočítáme reakční síly v ložiskách. V této kapitole budou spočítány reakční síly pouze pro technologii frézování. Technologie vrtání zatěžuje ložiska především axiálně a radiální síly pro tento případ zanedbáváme. Proto axiální síla při vrtání bude rovnou použita při výpočtu ložisek a odečtena z výpočtového softwaru Sandvik Coromant.

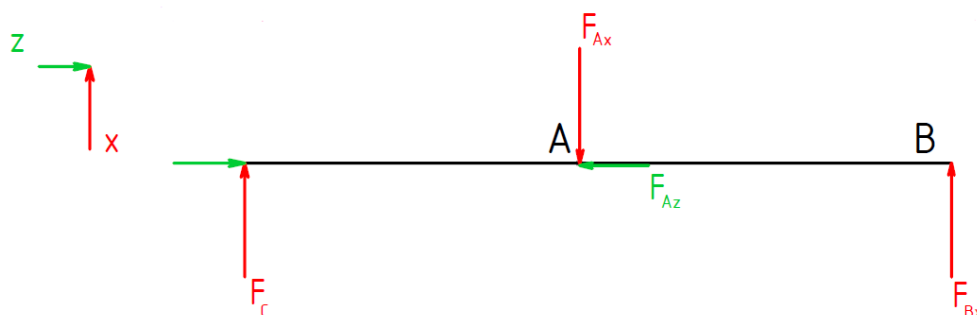


Obr. 24) Vzdálenosti působících sil na vřeteno

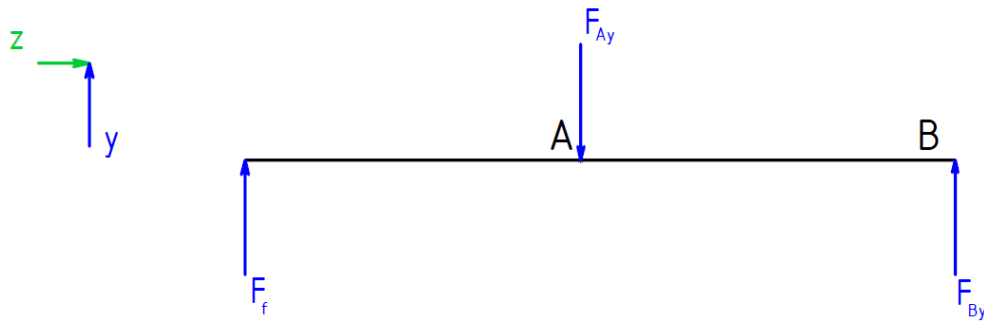
Směry působení řezných a reakčních sil:



Obr. 25) Prostorově znázorněné působení reakčních a řezných sil



Obr. 26) Síly působící v rovině z-x



Obr. 27) Síly působící v rovině z-y

*Reakční síly v bodě A*

V ose X

$$F_{AX} = \frac{F_c(l_n + l_1 + l_2)}{l_2} \quad (15)$$

Po dosazení

$$F_{AX} = \frac{1510(88,4 + 61 + 162)}{162} = 2902,7 \text{ N} \quad (16)$$

V ose Y

$$F_{AY} = \frac{F_f(l_n + l_1 + l_2)}{l_2} \quad (17)$$

Po dosazení

$$F_{AY} = \frac{377,5(66,4 + 61 + 162)}{162} = 725,7 \text{ N} \quad (18)$$

*Celková radiální síla v bodě A*

$$F_A = \sqrt{F_{AX}^2 + F_{AY}^2} \quad (19)$$

Po dosazení

$$F_A = \sqrt{2902,7^2 + 725,7^2} = 2992 \text{ N} \quad (20)$$

V ose Z

$$F_A = F_p = 604 \text{ N} \quad (21)$$

*Reakční síly v bodě B*

V ose X

$$F_{BX} = F_{AX} - F_c \quad (22)$$

Po dosazení

$$F_{BX} = 2902,7 - 1510 = 1392,6 \text{ N} \quad (23)$$

V ose Y

$$F_{BY} = F_{AY} - F_f \quad (24)$$

Po dosazení

$$F_{BY} = 725,7 - 377,5 = 348,2 \text{ N} \quad (25)$$

Celková radiální síla v bodě B

$$F_B = \sqrt{F_{BX}^2 + F_{BY}^2} \quad (26)$$

Po dosazení

$$F_B = \sqrt{1392,6^2 + 348,2^2} = 1435,5 \text{ N} \quad (27)$$

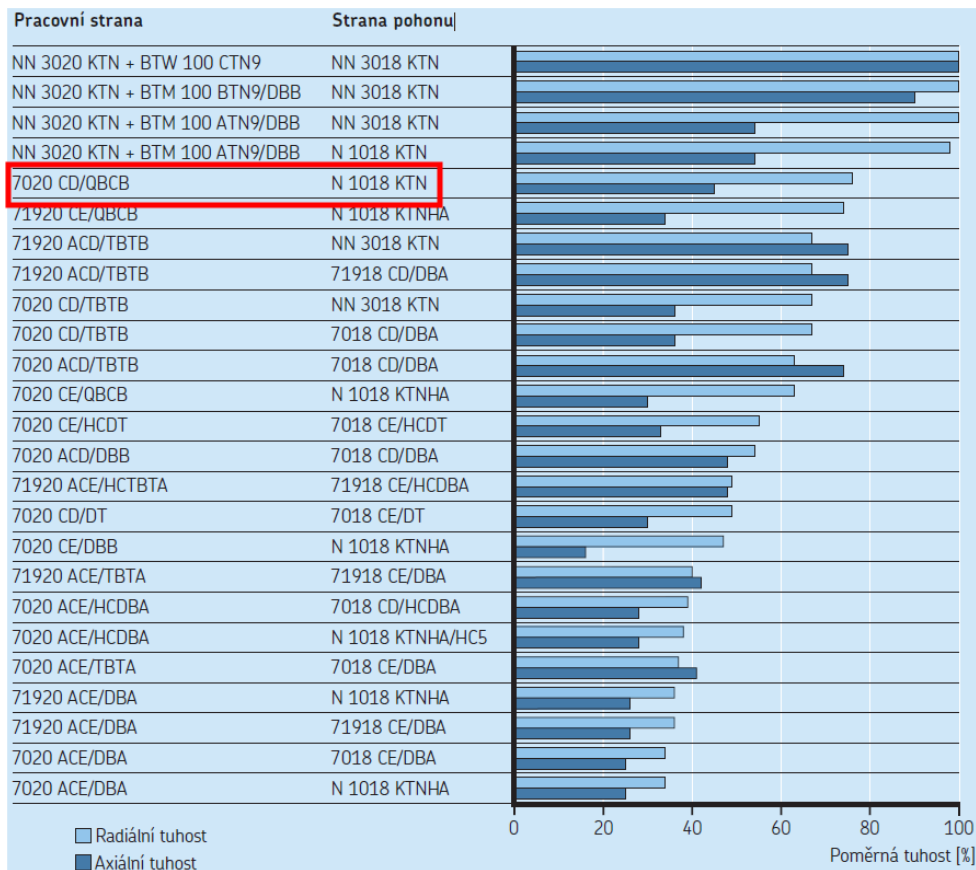
Ložisko v bodě B je válečkové a přenáší pouze radiální síly. Axiální reakční síly zde nevznikají.

## 4.4 Návrh ložisek

Ložiska jsou nejdůležitější částí vřetene, jejich vlastnosti ovlivňují spoustu parametrů vřetene, tuhost, přesnost, max. otáčky atd. Volíme je na základě reakčních sil vzniklých od řezných sil. Požadovaná životnost ložisek bude 25000 hodin, to je životnost pro stroje pro osmihodinový denní provoz, které však nejsou vždy plně využívány. Maximální dovolené otáčky musí být alespoň  $7000 \text{ min}^{-1}$  dle maximálních otáček motoru. Přední sada ložisek bude zachycovat axiální a radiální sílu od frézování, zadní ložisko pouze radiální.[1]

### 4.4.1 Volba ložiskového uspořádání

Dle předpokládané aplikace byla pomocí příručky SKF, knihy Konstrukce CNC obráběcích strojů a nadcházejících výpočtů zvolena kombinace využití sady tří vysoce přesných ložisek s kosoúhlým stykem řady 7014, kde dvě ložiska jsou uspořádány do tandemu a jedno proti nim do „O“ a na zadní straně válečkové ložisko N1011. Zvolená kombinace parametry odpovídá ložiskům vyznačeným níže 7020 a N 1018 pouze s jinými rozměry, výrobce neuvádí tabulku pro řadu 7014. Z grafu vyplývá, že tato kombinace ložisek má vynikající radiální tuhost a schopnost přenášet ohybové momenty s dostatečnou axiální tuhostí a zároveň díky prostorově ekonomickému uspořádání ložisek lze dosáhnout kompaktních rozměrů. [3; 1]



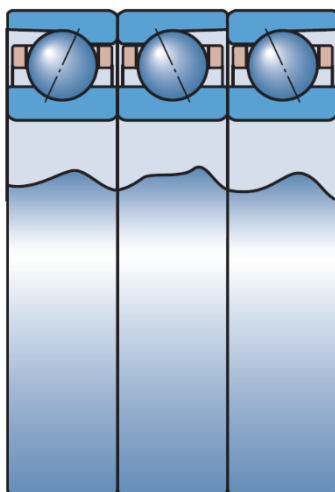
Obr. 28) Porovnání možných variant uspořádání ložisek [3]

#### 4.4.1.1 Přední ložiskové uskupení

Volbu velikosti ložiska ovlivnila především minimální velikost vřetene, která se odvíjela od upínacího mechanismu nástroje od firmy OTT-JAKOB a vnitřního průměru rotoru motoru od firmy Siemens. Proto byla zvolena sada tří spárovaných kosoúhlých ložisek SKF 7014 ACD/P4ATBTB s kontaktním úhlem 25°. Tato ložiska jsou dodávána s požadovaným předpětím od výrobce (nemusí se tedy osazovat lícovacími elementy).

Životnost vyšla 41772 hod, což je výrazně nad požadovanou hodnotu 25000 hod, to je způsobeno výše zmíněným rozměrovým omezením, vycházejícím od výměny nástrojů a průměru rotoru, kvůli kterým nebylo možné zvolit menší průměr ložisek. Zvolená ložiska jsou také hybridní konstrukce, to znamená, že valivé elementy jsou vyrobené z keramických materiálů, díky tomu dosahují vyšší tuhosti a životnosti. Při použití pouze dvou ložisek s kosoúhlým stykem nebo ložisek s ocelovými valivými elementy životnost nedosahovala požadovaných parametrů.

Uspořádání do „O“ bylo zvoleno z důvodu odolnosti uložení vřetena vůči kolizním stavům (zlomení nástroje, kolize při testování programu atd.). Při těchto stavech dochází k překročení maximálních předpokládaných parametrů. Zvolené uspořádání zaručují uživateli vyšší životnost a nižší náklady na opravy.[3]



Obr. 29) Uspořádání ložisek „TBT“

#### 4.4.1.2 Zadní ložisko

Zadní ložisko SKF N1011 KPHA/HC5SP bylo zvoleno z řady vysoce přesných válečkových ložisek s kuželovou dírou. Ložisko opět přesahuje požadovanou životnost, což je způsobeno omezenou minimální velikostí díky upínacímu systému nástrojů. Ložisko je ovšem tak malé, že jej lze instalovat do volného prostoru uvnitř statoru a dosáhnou větší kompaktnosti vřetene.

Uvedené ložisko eliminuje případné teplotní deformace v podélném směru. Konstrukční uspořádání vřetene je provedeno tak, že uložení vřetena není staticky předurčené. Tím, že na ložisku je možné radiálně vymezit vůli (předpětí), vzniká možnost ovlivnění eliminace výrobních úchylek (velikost předpětí na ložisku) při montáži, záběhu a seřízení.[3]

#### 4.4.1.3 Vzdálenost ložisek

Ideální vzdálenost ložisek dle příručky SKF je 2,5 – 3 násobek průměru ložisek. Když vezmeme rozměr vnitřních průměrů obou použitých ložisek ( $\varnothing 70$  mm a  $\varnothing 55$  mm), získáme hodnotu minimální vzdálenosti 156,25 mm (při násobku průměrů ložisek 2,5). Při konstrukci byla kvůli velikosti rotoru motoru a velikosti použitých vřetenových matic minimální možná dosažitelná vzdálenost mezi ložisky 162 mm (viz Obr. 23), to splňuje doporučení SKF pro minimální vzdálenost mezi ložisky. Výše uvedený rozměr byl použit i v konstrukci, aby bylo možné dosáhnout co nejmenších rozměrů vřetene. Vzdálenost mezi ložisky přímo ovlivňuje všechny parametry uložení vřetene (tuhost, životnost atd.).[3]

#### 4.4.2 Životnost ložisek

##### 4.4.2.1 Výpočet životnosti ložiska A při frézování

Za přední ložisko bylo zvoleno ložisko SKF 7014 ACD/P4ATBTB s parametry:

Tab 11) Parametry předního ložiska

Parametr		Hodnota	Jednotka
Základní dynamická únosnost	C	106	kN
Základní statická únosnost	C <sub>0</sub>	132	kN
Výpočtový součinitel	f <sub>0</sub>	15,5	-
Opravný součinitel velikosti ložiska	f	1,12	-
Opravný součinitel stykového úhlu	f <sub>1</sub>	0,99	-
Opravný součinitel předpětí	f <sub>2B</sub>	1,02	-
Opravný součinitel hybridních ložisek	f <sub>HC</sub>	1	-
Předpětí	G <sub>B</sub>	810	N

*Předepnutí v sadě ložisek*

$$G_m = f f_1 f_2 f_{HC} G_B \quad (28)$$

$$G_m = 1,12 \times 0,99 \times 1,02 \times 1 \times 810 = 916,1 \text{ N} \quad (29)$$

*Vnější axiální síly působící na ložisko*

$$K_a = F_p = 604 \text{ N} \quad (30)$$

*Axiální složka zatížení ložiska*

Vzorec pro axiální zatížení kosoúhlých ložisek závisí na poměru vnějších axiálních sil a síly předepnutí. V tomto případě platí následující vztah (31) z příručky SKF.

$$K_a \leq 3 \times G_m \rightarrow F_a = G_m + 0,67 \times K_a \quad (31)$$

$$F_a = G_m + 0,67 K_a$$

Po dosazení

$$F_a = 916,1 + 0,67 \times 604 = 1320,8 \text{ N} \quad (32)$$

### Ekvivalentní zatížení ložiskové sady

Ekvivalentní zatížení ložiska slouží k vyjádření působení axiální i radiální sil působících na ložisko jednou hodnotou. Pro sadu tří kosoúhlých ložisek uspořádaných do „O“ platí následující vztah:

Když:

$$\frac{F_a}{F_r} \leq e \quad (33)$$

$F_r = F_A = 2992 \text{ N}$  po dosazení

$$\frac{1320,8}{2992} = 0,441 \leq 0,68 \quad (34)$$

Poté používáme vztah

$$P = F_r + Y_1 \times F_a \quad (35)$$

Součinitel  $Y_1$  odečten z příručky ložisek SKF.  $Y_1 = 0,92$

Po dosazení

$$P = 2992 + 0,92 \times 1320,8 = 5171,4 \text{ N} \quad (36)$$

Životnost ložiska v bodě A při frézování

$$L_A = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \times \frac{10^6}{60 \times n_n} \quad (37)$$

Po dosazení

$$L_A = \left(\frac{106000}{5171,4}\right)^3 \times \frac{10^6}{3436} = 41\,772,4 \text{ hod} \quad (38)$$

#### 4.4.2.2 Výpočet životnosti ložiska B při frézování

V zadní části bylo zvoleno za ložisko B, SKF N1011 KPHA/HC5SP s parametry

Tab 12) Parametry zadního ložiska

Parametr		Hodnota	Jednotka
Základní dynamická únosnost	C	37,4	kN
Základní statická únosnost	C <sub>0</sub>	44	kN

### Ekvivalentní zatížení válečkového ložiska

Ekvivalentní zatížení je rovno radiálnímu, válečkové ložisko nemůže přenášet axiální síly.

$$P = F_B = 1435,5 \text{ N} \quad (39)$$

*Životnost ložiska v bodě B při frézování*

$$L_B = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} \times \frac{10^6}{60 \times n_n} \quad (40)$$

Po dosazení

$$L_B = \left(\frac{37400}{1435,5}\right)^3 \times \frac{10^6}{3436} = 254\,310 \text{ hod} \quad (41)$$

#### 4.4.2.3 Výpočet životnosti ložiska A při vrtání

Parametry ložiska jsou stejné jako pro výpočet při frézování (viz Tab. 10), postup výpočtů je také shodný.

*Předepnutí v sadě ložisek*

$$G_m = f f_1 f_2 f_{HC} G_B = 916,1 \text{ N} \quad (42)$$

*Vnější axiální síly působící na ložisko*

$$K_a = F_p = 2470 \text{ N} \quad (43)$$

*Axiální složka zatížení ložiska*

Vzorec pro axiální zatížení kosoúhlých ložisek závisí na poměru vnějších axiálních sil a síly předepnutí. V tomto případě platí následující vztah z příručky SKF.

$$K_a > 3G_m \rightarrow F_a = K_a = 2470 \text{ N} \quad (44)$$

*Ekvivalentní zatížení ložiskové sady*

Ekvivalentní zatížení ložiska slouží k vyjádření působení axiálních i radiálních sil působících na ložisko jednou hodnotou. Pro sadu tří kosoúhlých ložisek uspořádaných do „O“ platí následující vztah:

$$\frac{F_a}{F_r} \geq e \quad (45)$$

$F_r = F_A = 2992 \text{ N}$  po dosazení

$$\frac{2470}{1} = 2470 \geq 0,68 \quad (45)$$

Poté používáme vztah:

$$P = X_2 \times F_r + Y_2 \times F_a \quad (46)$$

Součinitel  $Y_2$  a  $X_2$  odečten z tabulky 38 příručky SKF.  $Y_2 = 2,2$   $X_2 = 0,72$

Po dosazení

$$P = 0,67 \times 1 + 2,2 \times 2470 = 5434 \text{ N} \quad (47)$$

*Životnost ložiska v bodě A při vrtání*

$$L_A = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \times \frac{10^6}{60 \times n_n} \quad (48)$$

Po dosazení

$$L_A = \left(\frac{106000}{5454}\right)^3 \times \frac{10^6}{3100} = 39906,7 \text{ hod} \quad (49)$$

#### 4.4.2.4 Výpočet životnosti ložiska B při vrtání

Při vrtání jsou vytvářeny pouze zanedbatelné radiální síly, proto životnost válečkového ložiska nebude počítána, jelikož válečkové ložisko přenáší pouze radiální síly.

#### 4.4.3 Mazání ložisek

Díky nízkým maximálním otáčkám vřetene a snahou o kompaktní provedení konstrukčního řešení, bezúdržbový provoz bylo zvoleno mazání plastickým mazivem. Udávané maximální otáčky pro mazání plastickým mazivem jsou  $15\,000\text{ min}^{-1}$  pro kosoúhlá ložiska a  $13\,000\text{ min}^{-1}$  pro válečkové ložisko. Tím jsou splněny požadavky na chod ložisek při zachování maximální životnosti. [3]

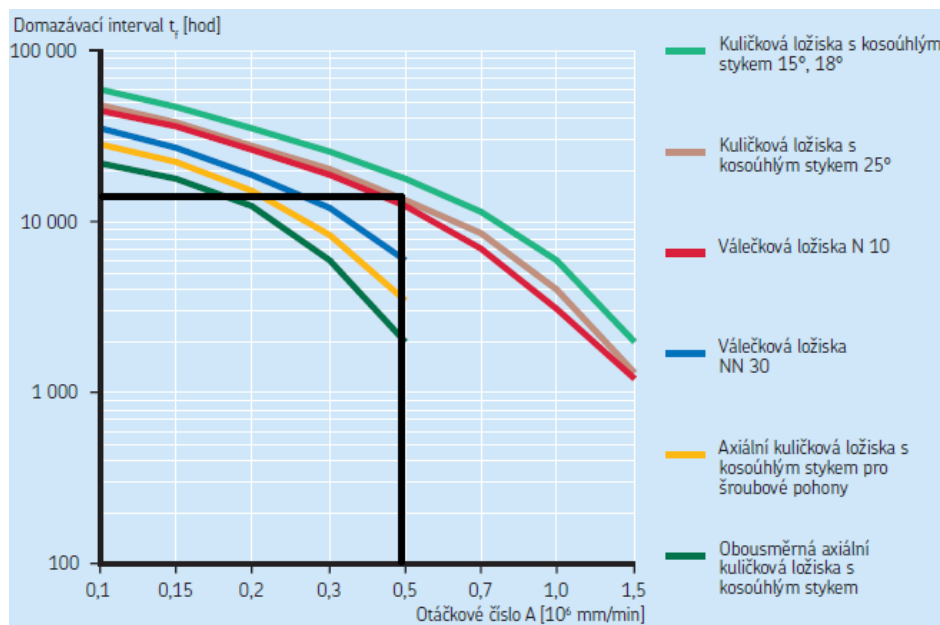
Typ plastického maziva byl zvolen pomocí aplikace SKF Lube select for SKF greases. Do aplikace byly zadány parametry ložisek a provozní parametry vřetene z výpočtu níže. Následně bylo z nabídky vybráno mazivo, které aplikace navrhla pro obě ložiska a zároveň byla životnost maziva alespoň 25 000hod. Tyto požadavky splňovalo mazivo SKF LGET2, s parametry životnosti maziva při použití uložení 49 400hod. Jedná se o mazivo na bázi syntetických fluorovaných olejů s PTFE zahušťovadlem. [5]

#### 4.4.4 Domazávací interval ložisek

K životnosti maziva spočítaného aplikací SKF Lube select je ještě dopočítán domazávací interval ložisek, který určuje interval doplnění uniklého maziva v průběhu provozu.

##### 4.4.4.1 Domazávací interval pro ložisko s kosoúhlým stykem

Z diagramu byl odečten domazávací interval  $t_f$  a následně upraven opravnými činiteli z příručky SKF dle typu ložiska a způsobu aplikace ložiska.



Obr. 30) Domazávacího interval pro kosoúhlé ložiska dle SKF [3]

### *Domazávací interval*

Odečten z tabulky (otáčkové číslo  $A = n_{max} \times d_A = 0,49 \times 10^6 \text{ mm/min}$ ).

$$t_{fA} = 15\,000 \text{ hod}$$

Hodnota domazávacího intervalu je dále upravena opravnými součiniteli dle použití ložiska a podmínek provozu.

### *Opravný součinitel pro sady ložisek a různé třídy předpětí*

Součinitel je odečten pro odpovídající třídu předpětí ložiska(A) a jeho uspořádání TBT.

$$C_1 = 0,63$$

### *Opravný součinitel hybridních ložisek*

Hodnota pro kuličková ložiska s kosoúhlým stykem a odpovídající otáčkové číslo A.

$$C_2 = 3$$

### *Opravný součinitel provozních podmínek*

Závislý na orientaci ložiska, hodnota je zvolena pro svislou orientaci.

$$C_3 = 0,5$$

### *Opravný součinitel zatížení ložiska*

Volený podle rozdílu zatížení ložiska a dovoleného dynamického zatížení, v tomto případě  $P = 0,049C$ .

$$C_4 = 1$$

### *Opravný součinitel spolehlivosti*

Pro spolehlivost  $L_1$  (99%)

$$C_5 = 0,37$$

### *Opravný součinitel proudění vzduchu ložiskem*

Předpokládáme nízké proudění vzduchu ložiskem z důvodu zakrytování ložiskových zástav.

$$C_6 = 1$$

### *Opravný součinitel vlhkosti a prachu*

Díky zakrytování ložisek a zatěsnění celého prostoru elektrovřetene je předpokládána nízká vlhkost a prašnost.

$$C_7 = 1$$

### *Opravný součinitel provozní teploty*

Není předpokládána teplota ložisek větší než  $40^\circ\text{C}$ , díky implementaci chlazení přírub pro ložiska.

$$C_8 = 2$$

### *Mazací interval upravený provozními činiteli*

$$T_{fA} = t_f \times C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times C_6 \times C_7 \times C_8 \quad (50)$$

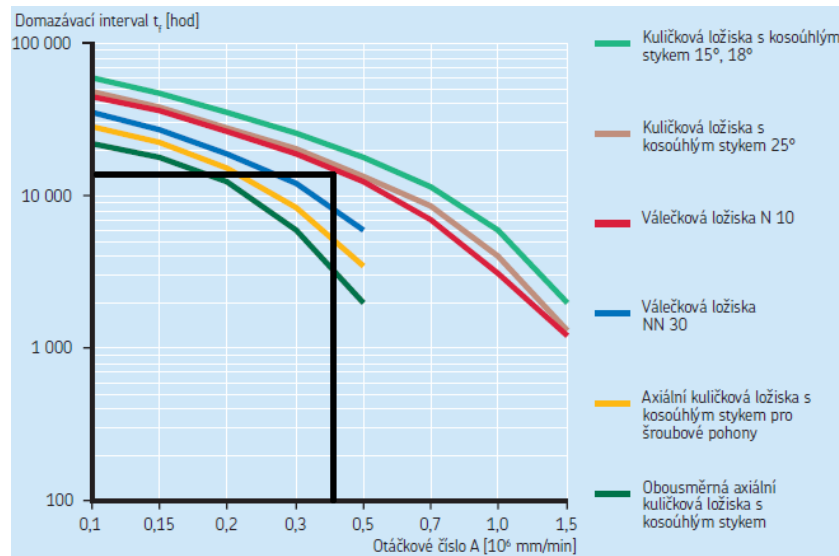
Po dosazení

$$T_{fA} = 15\,000 \times 0,63 \times 3 \times 0,5 \times 1 \times 0,37 \times 1 \times 1 \times 2 = 10\,490 \text{ hod} \quad (51)$$

Po dosažení všech korekčních činitelů vyšel interval pro domazávání 10 490 hodin. Je to méně než životnost ložiska, z toho vyplývá nutnost domazávání v průběhu životnosti vřetena. [3]

#### 4.4.4.2 Domazávací interval pro válečkové ložisko

Výpočet domazávacího intervalu pro válečkové ložisko je počítán obdobně jako pro kosoúhlé ložiska, pouze se změnou parametrů týkající se konstrukce válečkového ložiska.



Obr. 31) Domazávací interval pro válečkové ložisko dle SKF [3]

*Domazávací interval*

$$t_{fB} = 13\,000 \text{ hod}$$

*Opravný součinitel pro sady ložisek a různé třídy předpětí*

Tento součinitel se vztahuje pouze pro kosoúhlá ložiska, proto je vynechán.

*Opravný součinitel hybridních ložisek*

$$C_2 = 3$$

*Opravný součinitel provozních podmínek*

$$C_3 = 0,5$$

*Opravný součinitel zatížení ložiska*

$$C_4 = 1$$

*Opravný součinitel spolehlivosti*

$$C_5 = 0,37$$

*Opravný součinitel proudění vzduchu ložiskem*

$$C_6 = 1$$

*Opravný součinitel vlhkosti a prachu*

$$C_7 = 1$$

*Opravný součinitel provozní teploty*

$$C_8 = 2$$

Mazací interval upravený provozními činiteli

$$T_{fB} = t_f \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times C_6 \times C_7 \times C_8 \quad (52)$$

Po dosazení

$$T_{fB} = 13\,000 \times 3 \times 0,5 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 2 = 14\,430 \text{ hod} \quad (53)$$

Po dosazení všech korekčních činitelů vyšel interval pro domazávání 14 430 hodin. Je to vyšší hodnota než u kosoúhlého ložiska, tudíž doporučený interval domazávání se odvíjí od kosoúhlého, z důvodu zjednodušení servisních úkonů. Domazávací interval je určen na 10 000 hod provozu nebo 2 roky, kvůli stárnutí maziva. S domazáváním bude provedena i kontrola stavu ložisek [5; 3]

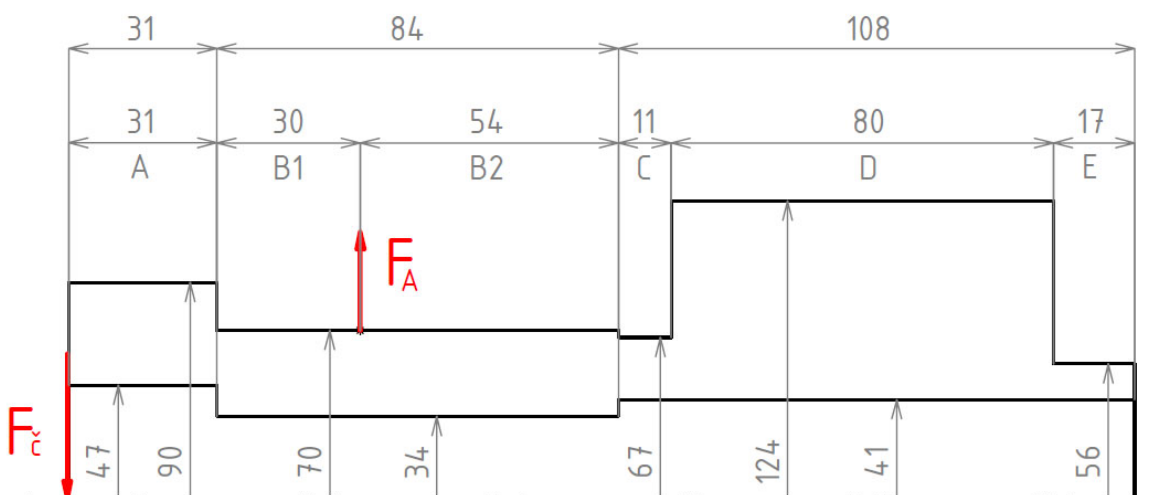
## 4.5 Tuhost elektrovřetena

Tuhost je jedním z nejzásadnějších ukazatelů vlastností elektrovřetene. Skládá se ze složek tuhosti vřetene, tuhosti ložisek, tuhosti vřetenové skříně (tubusu) a na výslednou přesnost má vliv i tuhost uložení ve stroji, kterou pro tento případ neuvažujeme, jelikož není známý způsob uložení elektrovřetene.

### 4.5.1 Tuhost vřetene

Tuhost vřetene ovlivňuje především jeho průřez a z toho vycházející kvadratický moment a délka společně se zvoleným materiálem vřetene. Pro výpočet bylo vřeteno zjednodušeno na 5 oblastí rozdělených podle průřezu.

Jelikož je rotor motoru spojen s vřetenem spojem s přesahem, uvažujeme ho jako homogenní součást vřetene. Vzdálenosti a kvadratické momenty byly odečteny z CAD softwaru, zatěžující síly jsou převzaty z předchozích výpočtů. Uvažuje se, že zatěžovací síla je síla působící na čele vřetene a je vyvolávána řeznou silou. Přední ložiskové uložení je nahrazeno reakční silou a zadní je uvažováno jako pevné, jelikož zde nedochází k průhybu.



Obr. 32) Rozměry průřezů zjednodušeného vřetene

Tab 13) Velikosti oblastí a jejich kvadratické momenty

Parametr		Hodnota	Jednotka
Kvadratický moment v oblasti A	I <sub>a</sub>	2976989	mm <sup>4</sup>
Kvadratický moment v oblasti B	I <sub>b</sub>	1031579	mm <sup>4</sup>
Kvadratický moment v oblasti C	I <sub>c</sub>	931036	mm <sup>4</sup>
Kvadratický moment v oblasti D	I <sub>d</sub>	11466597	mm <sup>4</sup>
Kvadratický moment v oblasti E	I <sub>e</sub>	465504	mm <sup>4</sup>
Velikost oblasti A	x <sub>a</sub>	31	mm
Velikost oblasti B <sub>1</sub>	x <sub>b1</sub>	30	mm
Velikost oblasti B <sub>2</sub>	x <sub>b2</sub>	54	mm
Velikost oblasti C	x <sub>c</sub>	11	mm
Velikost oblasti D	x <sub>d</sub>	80	mm
Velikost oblasti E	x <sub>e</sub>	17	mm

Výpočet byl proveden pomocí rovnice energie napjatosti upravenou na Castiglianovu větu. Z rovnice pro energii napjatosti, kde „w“ je posuv v místě působení síly, „W“ je energie napjatosti a „F“ je síla působící v místě posuvu.

$$w = \frac{\partial W}{\partial F} \quad (54)$$

Tato rovnice byla vyjádřena a upravena na vztah:

$$w = \frac{\partial \int_0^L \frac{M_0^2}{2 \times E \times I}}{\partial F} = \int_0^L \frac{M_0}{E \times I} \times \frac{\partial M_0}{\partial F} \times dx \quad (55)$$

Po dosazení momentů a vzdáleností pro jednotlivé oblasti

$$w = \int_0^{x_a} \frac{M_{oa}}{E \times I_a} + \frac{dM_{oa}}{dF_c} dx + \int_0^{x_{b1}} \frac{M_{ob1}}{E \times I_b} + \frac{dM_{ob1}}{dF_c} dx + \int_0^{x_{b2}} \frac{M_{ob2}}{E \times I_b} + \frac{dM_{ob2}}{dF_c} dx + \int_0^{x_c} \frac{M_{oc}}{E \times I_c} + \frac{dM_{oc}}{dF_c} dx + \int_0^{x_d} \frac{M_{od}}{E \times I_d} + \frac{dM_{od}}{dF_c} dx \quad (56)$$

Kompletní vyjádření rovnic

$$w = \int_0^{x_a} \frac{F_{\check{c}} \times x}{E \times I_a} \times x dx + \int_0^{x_{b1}} \frac{F_{\check{c}} \times (x_a + x)}{E \times I_b} \times (x_a + x) dx + \int_0^{x_{b2}} \frac{F_{\check{c}} \times (x_a + x_{b1} + x) - F_A \times x}{E \times I_b} \times (x_a + x_{b1} + x) dx + \int_0^{x_c} \frac{F_{\check{c}} \times (x_a + x_{b1} + x_{b2} + x) - F_A \times (x_{b2} + x)}{E \times I_c} \times (x_a + x_{b1} + x_{b2} + x) dx + \int_0^{x_d} \frac{F_{\check{c}} \times (x_a + x_{b1} + x_{b2} + x_c + x) - F_A \times (x_{b2} + x_c + x)}{E \times I_d} \times (x_a + x_{b1} + x_{b2} + x_c + x) dx + \int_0^{x_e} \frac{F_{\check{c}} \times (x_a + x_{b1} + x_{b2} + x_c + x_d + x) - F_A \times (x_{b2} + x_c + x_d + x)}{E \times I_d} \times (x_a + x_{b1} + x_{b2} + x_c + x_d + x) dx \quad (57)$$

Po vyjádření

$$w = \delta_V = 24 \mu m \quad (58)$$

#### 4.5.2 Tuhost ložisek

Tuhost ložisek je udávána výrobcem, ovlivňuje ji velikost kroužků a valivých elementů ložisek a jejich materiál. V případě předních ložisek je udávána axiální tuhost a radiální se dopočítává pomocí vzorců pro jednotlivá uspořádání ložisek. Pro tento případ uspořádání výrobce uvádí radiální tuhost 1,36x větší než udávána axiální. Posun vřetene v ložiskách  $\delta$  se vypočítá vydělením radiální síly působící na ložisko tuhostí daného ložiska.[21]

*Ložisková soustava A*

Axiální tuhost

$$k_{ax} = 361.05 \frac{N}{\mu m}$$

Radiální tuhost

$$k_{rA} = 1.36 \times k_{ax} = 1.36 \times 361.05 = 982,06 \frac{N}{\mu m} \quad (59)$$

*Deformace ložisek A*

$F_A$  ... celková radiální síla v bodě A (20)

$$\delta_A = \frac{F_A}{k_{rA}} \quad (60)$$

Po dosazení

$$\delta_A = \frac{2992}{982,06} = 3,05 \mu m \quad (61)$$

*Ložisko B*

Ložisko B je kuličkové s volným vnějším kroužkem pro vyrovnávání teplotních dilatací vřetene, proto u něj axiální tuhost neexistuje

Radiální tuhost

$$k_{rB} = 700 \frac{N}{\mu m}$$

*Deformace ložiska B*

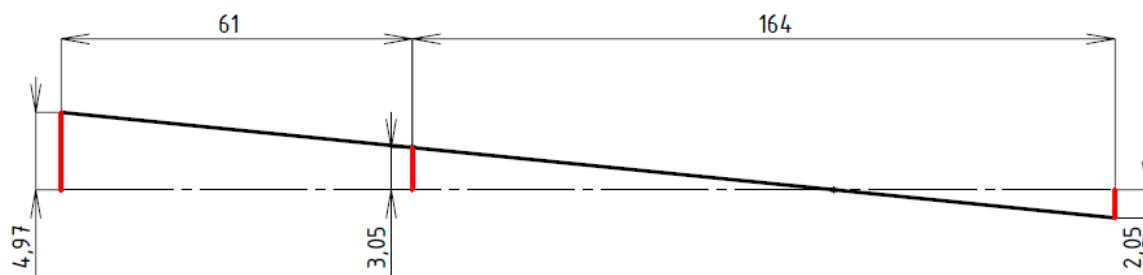
$F_B$  ... celková radiální síla v bodě B

$$\delta_B = \frac{F_B}{k_{rB}} \quad (62)$$

Po dosazení

$$\delta_B = \frac{1435}{700} = 2,05 \mu m \quad (63)$$

### Průhyb od ložisek na čele vřetena



Obr. 33) Schéma působení průhybů na vřeteno

Průhyb na čele vřetena zjistíme pomocí podobnosti trojúhelníků

$$\frac{\delta_{AB} + \delta_B}{\delta_{AB} + \delta_A} = \frac{(x_{b2} + x_c + x_d + x_e) + (x_1 + x_2)}{(x_{b2} + x_c + x_d + x_e)} \quad (64)$$

Po vytknutí  $\delta_{AB}$

$$\delta_{AB} = \delta_A + \frac{(x_1 + x_2)}{(x_{b2} + x_c + x_d + x_e)} \times (\delta_A + \delta_B) \quad (65)$$

Po dosazení

$$\delta_{AB} = 3,05 + \frac{61}{164} \times (3,05 + 2,05) = 4,97 \mu m \quad (66)$$

#### 4.5.3 Celková tuhost elektrovřetene

Celková tuhost elektrovřetene se skládá z tuhosti ložisek, tuhosti vřetena a tuhosti těla elektrovřetene. Tuhost těla elektrovřetene by bylo numerickými metodami obtížné spočítat z důvodu komplexnosti součásti a závislosti na parametrech uložení ve stroji, budeme pro tento příklad uvažovat jeho dokonalou tuhost  $\delta_T = 0 \mu m$ . [1; 6]

*Celkový průhyb vřetene*

$$\delta_C = \delta_{AB} + \delta_V + \delta_T \quad (67)$$

Po dosazení

$$\delta_C = 4,97 + 24 + 0 = 28,97 \mu m \quad (68)$$

*Celková tuhost vřetene*

$$k_C = \frac{F_{\check{c}}}{\delta_C} = 132 \frac{N}{\mu m} \quad (69)$$

Výsledná tuhost elektrovřetene 132 N/mm s průhybem  $\delta_C \doteq 29 \mu m$  na čele vřetena, není nejideálnější. Je ale nutné brát v úvahu použití nejvíce zatěžujících řezných podmínek, kterých je vřeteno schopné dosáhnout po delší časový úsek. Pro dokončovací operace, kde jsou řezné síly působící na vřeteno výrazně nižší by bylo i radiální házení vřetene výrazně nižší.

## 5 KONSTRUKCE

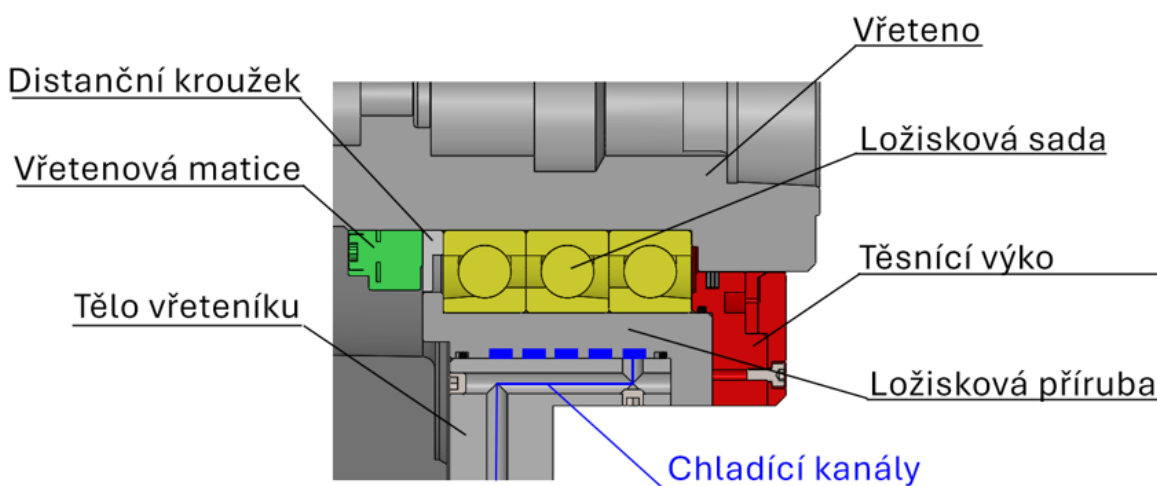
V této kapitole bude popsán postup konstrukce jednotlivých prvků a uzlů a jejich vzájemné návaznosti. Úvahy a volby prvků v této kapitole probíhají souběžně s úvahami v kapitole 4. Návrh klíčových uzlů

### 5.1 Přední uložení vřetena

Pro přední uložení vřetena byly dle výpočtů z kapitoly 4.4. Návrh ložisek zvoleny ložiska od firmy SKF provedení TBT. Výrobce klade velmi přesné požadavky na tolerance u průměrů pro vnitřní a vnější uložení ložisek. Hodnoty tolerancí pro uložení byly zvoleny dle doporučení SKF. Tolerance pro uložení ložiska na průměru 70 mm na vřetenu je zvolena js5 s podmínkou obalové plochy. Tolerance vnějšího průměru uložení v přírubě je pro horní mezní rozměr +11 $\mu$ m a pro dolní mezní rozměr - 11 $\mu$ m. Tolerance uložení vnějšího a vnitřního kroužku odpovídají neposuvnému uložení vnějšího kroužku. [21]

Protože se jedná o ložiska se zaručeným předpětím od výrobce, je celá soustava ložisek na vřetenu stažena a zajištěna vřetenovou maticí MSF M70x1,5. Tato matice byla zvolena oproti matici od firmy SKF z důvodu většího vnitřního průměru, daný použitím zavitu s jemným stoupáním. Tím vzniklo osazení pro určení polohy rotoru elektromotoru. Pod maticí je distanční kroužek, tvořící jednoduchý labyrint, zabraňující vniknutí případných nečistot do prostoru ložisek, v opačném případě zabraňují úniku maziva z prostoru ložisek.

Další požadavek výrobce pro zastavěný prostor ložisek je tolerance tvaru a polohy dosedací plochy čela vnitřního kroužku. Na dosedací plochu ložisek na vřeteni je požadavek házení 2  $\mu$ m, uvedeno na detailním výkresu vřetene. Vnější uložení ložisek je realizováno v ložiskové přírubě, která splňuje požadavky na zachycení axiálních sil od vřetena. Na vnějším průměru je vytvořena chladicí spirála, utěsněna v přední a zadní části příruby těsnícími O-kroužky. Ložisková příruba musí splňovat požadované geometrické tolerance (házení 3  $\mu$ m) na čele dosednutí soustavy ložisek. V přední části je přišroubováno těsnící víko. Ložisková příruba je přesně zapozicována v tělese elektrovřetena.



Obr. 34) Částečný řez předního ložiskového uložení

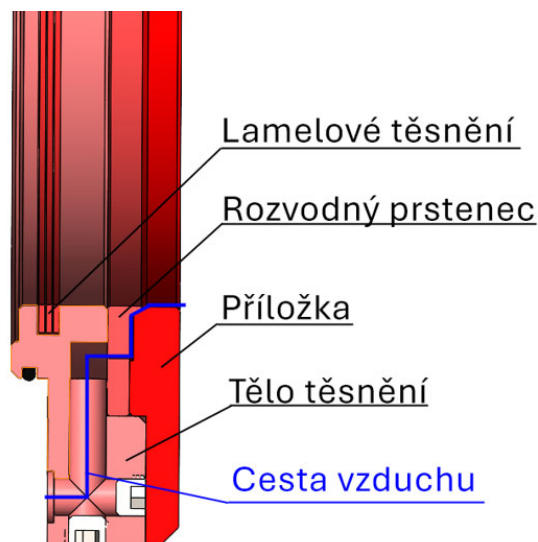
## 5.2 Těsnící víko

Na konstrukci těsnícího víka jsou kladeny vysoké požadavky s ohledem na utěsnění ložiskového prostoru od pracovního prostoru. Jedná se o prostředí tvořené procesem obrábění (třísky, chladicí médium a nečistoty). Důležitým prvkem chránící ložiska uložení vřetene je lamelové těsnění. Jedná se o standartně používaná lamelová těsnění od firmy FEY řady FK 3 AS, která udává přesné rozměry zastavěného prostoru dle použitého typu kroužku pro zabudování ve vřetenu. Kroužek je centrován v těsnícím víku. Kroužky jsou spirálovitého provedení, které se do drážky ručně našroubují.

Pro montáž, záběh a provoz je použit speciální mazací prostředek Gleitmo 980. Při požadovaném záběhu dojde k přesnému vycentrování kroužků v drážce a vymezení vůlí, tím je zaručen deklarovaný bezkontaktní provoz. Toto těsnění neovlivňuje teplotně uložení vřetene. [22]

Dalším ochranným prvkem těsnícího víka je tlakové vzduchové těsnění. Pro dokonalou ochranu vřetena je využit usměrněný laminární proud vzduchu, který je přiváděn přes těleso elektrovřetena soustavou děr a štěrbin. Vyúsťuje ve spáře mezi těsnícím víkem a vřetenem. Dimenzování této vzduchové cesty respektuje rovnoměrné vyúsťení vzduchu po celém obvodu vřetena. To je dosaženo postupným zmenšováním průřezů průchodu mezi rozváděcími komorami. Vzduchová mezera pro vyúsťení vzduchu mezi vřetenem a příložkou je větší než mezera mezi vřetenem a rozvodným prstencem.

Víko je uloženo a utěsněno O-kroužkem v ložiskové přírubě. Zastavěná soustava ložisek TBT je na vnějším průměru vymezena lícováním čela těsnícího víka, s požadovanou tolerancí čelního házení. Přívod vzduchu v dělicí rovině ložiskové příruby a těsnícího víka je utěsněn pomocí O-kroužku.



Obr. 35) Částečný řez těsnícího víka

Výpočet průtoku vzduchu pomocí rovnice kritického proudění [23]

*Hmotnostní průtok*

$$\dot{m} = \frac{S \times p}{\sqrt{T}} \times \sqrt{\frac{\kappa}{R}} \times \left(\frac{\kappa + 1}{2}\right)^{-\frac{\kappa+1}{2 \times (\kappa-1)}} \quad (70)$$

Tab 14) Hodnoty pro výpočet

Hodnota		Hodnota	Jednotka
Průřez otvorů ve víku	S	$4\pi$	$\text{mm}^2$
Tlak	p	1	bar
Teplota	T	293.15	K
Plynová konstanta vzduchu	R	287	J/kg·K
Hustota vzduchu při 20°C	$\rho$	1,2047	$\text{kg/m}^3$
Poissonova konstanta	$\kappa$	1,4	-

Po dosazení

$$\dot{m} = \frac{1,256 \times 10^{-5} \times 10^5}{\sqrt{293,15}} \times \sqrt{\frac{1,4}{287}} \times \left(\frac{1,4 + 1}{2}\right)^{-\frac{1,4+1}{2 \times (1,4-1)}} = 0,00297 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (71)$$

*Převedení na objemový průtok*

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,00297}{1,2047} = 0,00246 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2,46 \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (72)$$

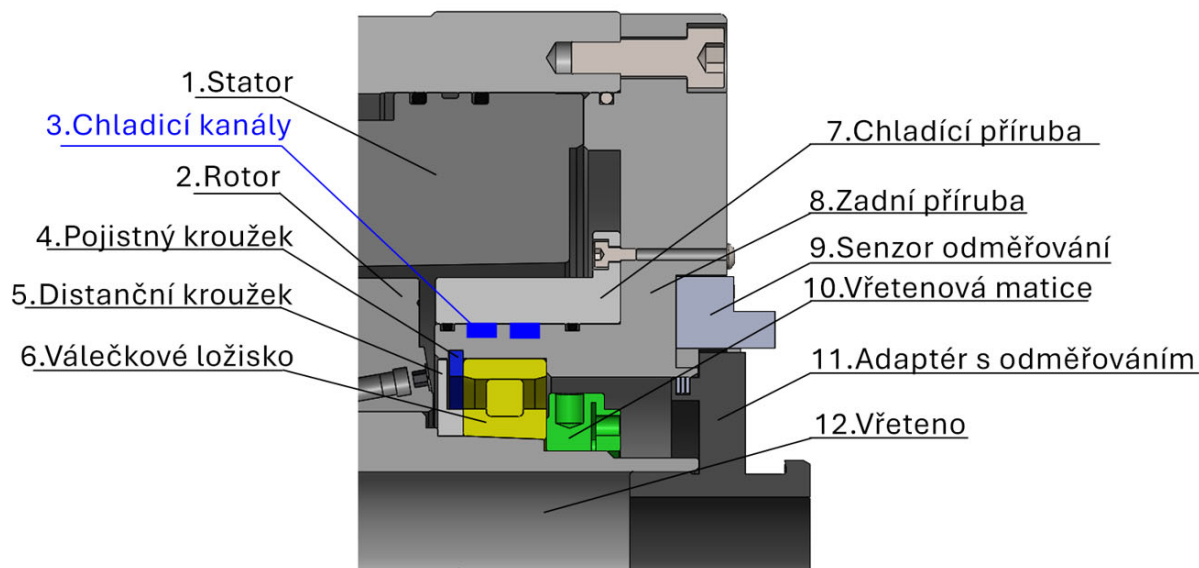
Maximální teoretický průtok vzduchu při tlaku 1 bar těsnícím víkem je 2,46 l/s reálná hodnota bude o něco menší z důvodu ztrát způsobených členitým vedením vzduchu elektrovřetenem.

### 5.3 Zadní uložení vřetene

Zadní část vřetena je uloženo válečkovým ložiskem řady N1011. Toto ložisko eliminuje osové teplotní deformace vřetene. Další výhodou je, že parametry chodu jsou seřizovatelné prostřednictvím vnitřního kroužku, který je opatřen kuželovou dírou. Princip spočívá v tom, že vůle, popřípadě předpětí se realizuje posunem vnitřního ložiskového kroužku na kuželi. Opakovatelnost je zaručena dolícováním distančního kroužku a přitažením ložiska vřetenovou maticí MSK M50x1,5. Distanční kroužek plní také funkci jednoduchého labyrintu chránící prostor ložiska před nečistotami a v zabraňuje úniku maziva z ložiska.

Vnější kroužek ložiska je uložen v zadní přírubě v díře o průměru 90 mm s tolerancí JS5. Přesná poloha je zajištěna pojistným kroužkem. Vnější průměr zadní příruby je opatřen spirálovou drážkou sloužící k chlazení uložení válečkového ložiska. Prostor chladičské spirály je utěsněn dvěma těsníci O-kroužky v tělese chladičské příruby. Chladičská příruba je centrována a spojena se zadní přírubou šrouby.

Těleso zadní příruby slouží také k uchycení statoru elektromotoru a je centrováno a pevně spojeno s tělesem elektrovřetena. Další funkci, kterou zajišťuje, je utěsnění uložení zadní části vřetena. FK 3 AS. Odměrovací kolo je součástí adaptéru, slouží k odečítání polohy a rychlosti vřetene, je opatřeno zuby s modulem 0,3. Adaptér s odečítáním je našroubován do zadní části vřetena. Adaptér také slouží k opření odepínacího systému nástroje při jeho výměně, aby nedocházelo k statickému přetěžování ložisek. K docílení požadované přesnosti uložení je adaptér středěn pomocí středícího průměru za broušeným závitem. Následně je adaptér zajištěn dvěma šrouby proti povolení. Z vnější strany zadní příruby je připevněna a centrována nosná příruba uvolňovacího mechanismu od firmy OTT-JAKOB. Všeobecně příruba také slouží k rozvodu médií pomocí rozvodových kanálků.



Obr. 36) Částečný řez zadního uložení

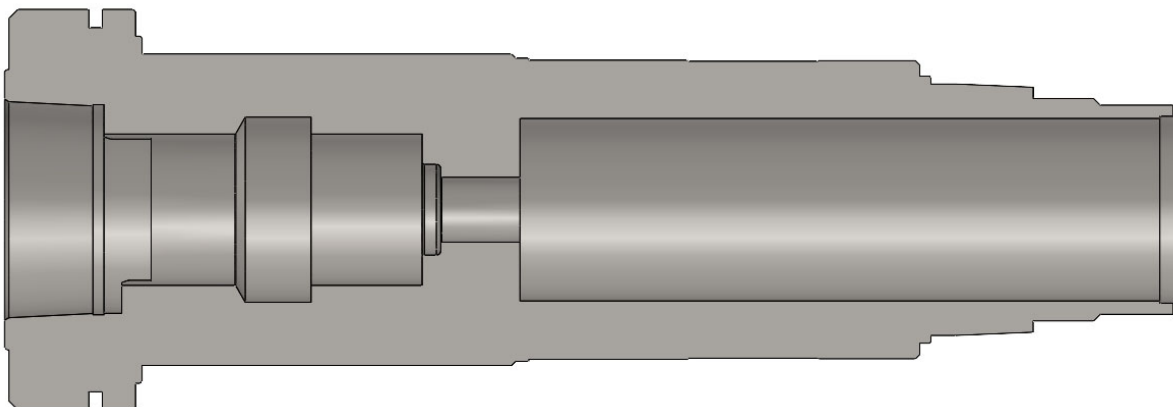
## 5.4 Vřeteno

Vřeteno je stěžejní díl elektrovřetena, jsou na něj kladeny vysoké požadavky na životnost, tvarovou a geometrickou stálost a technologickou proveditelnost. Vřeteno je cementováno a kaleno na HRC 58  $\pm$ 2 vyjíma ploch pro vyvažování proti které jsou chráněny při cementování a kalení. Pro vřeteno je použit materiál 14220.3 jedná se o ušlechtilou konstrukční mangan-chromovou ocel vhodnou k cementování a kalení. Vyznačuje se snadnou obrobiteľnosťou a geometrickou stálostí.

Vnější tvar je opatřen plochami s příslušnými tvarovými a geometrickými tolerancemi pro ložisková uložení, rotor motoru a v přední a zadní části plochami pro lamelové těsnění. Všechny funkční plochy jsou broušené. Vnější tvar vřetene je také opatřen přesnými broušenými závity pro vřetenové matice.

Uvnitř vřetene je v přední části speciální otvor pro uložení upínací kleštiny od firmy OTT-JAKOB s následným pokračování otvoru pro talířové pružiny s táhlem. V zadní části je závitový otvor pro uchycení adaptéru odepínací jednotky s odměrovacím kolem.

Vřeteno je dynamicky vyváženo, na předem určených vyvažovacích rovinách. Vyvažovací rovina se nachází za drážkou pro lamelové těsnění a mezi dosedacími plochami rotoru, roviny jsou chráněny před cementováním a kalením. Vyvažování se na nich provádí odvrtáváním daných nevyvážků.



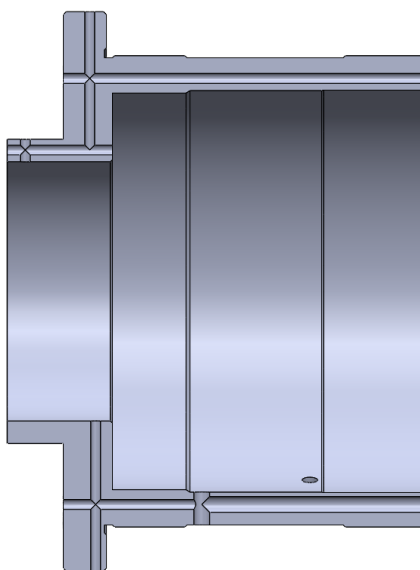
Obr. 37) Řez vřetene

## 5.5 Nosné tělo elektrovřetene

Hlavní nosný prvek elektrovřetene tvoří kompaktní těleso, které je uzavřeno pevně spojenou a polohovanou zadní přírubou. Vnitřní prostor tvoří osazený otvor udávající přesnou polohu statoru elektromotoru. Osazení otvoru umožňuje snadnou montáž těsnících elementů chlazení statoru.

V přední části je uložena přední ložisková příruba pevně spojená s nosným tělesem elektrovřetene. Pro snadnou montáž je vnější průměr tělesa rozdělen na dvě kontaktní plochy, kolmo na průměr je čelní dosedací plocha sloužící k připojení na vřeteník zákazníka. Připojovací rozměry jsou v přesných tolerancích tvaru a polohy vůči centračním průměrům předního a zadního uložení vřetena viz kapitola 5.11. Požadavky na zákazníka.

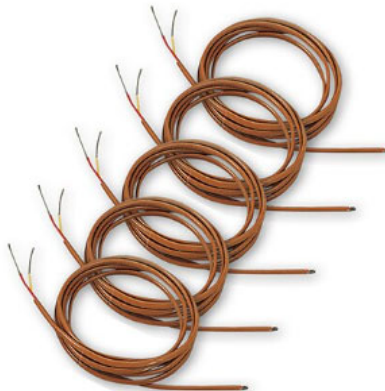
Dále v tělese jsou realizovány rozvody médií pomocí rozvodových kanálků. Přechod médií mezi čelními dělicími rovinami je zatěsněn pomocí O-kroužků.



Obr. 38) Řez tělem elektrovřetena

## 5.6 Senzorika vřetene

Přední a zadní uložení vřetena je osazeno bimetalovými termočlánky typu T od firmy DwyerOmega model 5TC-TT-T-24-120, které snímají přímo teplotu v přírubách uložení vnějších kroužků ložisek. K vhodnému přestupu tepla je použita elektricky nevodivá termopasta na silikonové bázi.

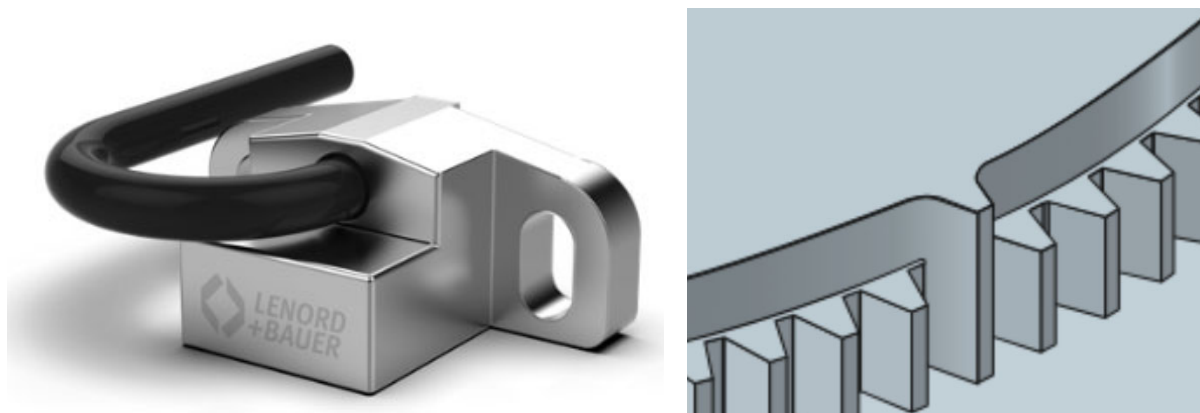


Obr. 39) Termočlánky DwaerOmega [24]

Ve statoru vřetena je od výrobce dodáváno teplotní číslo Pt1000, přímo zabudované ve vnutí motoru.

Odepínací jednotka od firmy OTT-JAKOB je osazena snímajícím čidlem upnutí a uvolnění nástroje snímané přímo z polohy táhla které ovládá upínací kleštinu, maximální délka kabelu od senzoru je 2 m pak musí následovat sensorová elektronika pro zpracování signálu. Další čidlo snímá polohu hydraulického pístu čímž je kontrolován funkce odepínací jednotky, hlídá ovšem pouze horní a spodní úvrat' nikoliv chod pístu. Pro kontrolu prosaku z odepínací jednotky slouží čidlo těsnosti hydraulického válce.

Rotační odměřování vřetene slouží k řízení motoru elektrovřetene a umožňuje zajistit přesnou polohu vřetene pro automatickou výměnu nástrojů. Tuto funkci zastává poziční a rychlostní senzor GEL 2444 od firmy Lenord+Bauer. Jedná se o plně konfigurovatelný magnetorezistivní senzor, který snímá ozubené odčítací kolo se zuby s modulem 0,3. Ozubené kolo je vybaveno jednou plnou řadou zubů pro snímání rychlosti a druhou řadou pouze o jednom zubu jako referenci pro odčítání polohy.[25]



Obr. 40) Magnetorezistivní senzor (vlevo) odčítací kolo (vpravo) [25]

## 5.7 Postup montáže

Celková montáž sestává z montáží podsestav, které lze smontovat předem.

První montážní podsestavou je podsestava vřetene, na které se montuje sada kosoúhlých ložisek 7014 zajištěných přes distanční kroužek maticí MSF 70x1,5. uložení se vloží do přední ložiskové příruby. Následně se nasune ohřátý rotor, přesná poloha rotoru na vřetenu je zajištěna opěrným kroužkem. Dále se přes předem odlícovaný lícovací kroužek montuje vnitřní část válečkového ložiska N1011 přesná poloha a vymezení vůle je zajištěno maticí MSF 50x1,5.

Druhou montážní podsestavou je podsestava zadního víka s ložiskovým uložením. Do ložiskového otvoru se vloží vnější kroužek válečkového ložiska a zajistí se pojistným kroužkem. Na vnější průměr se namontují těsnící kroužky, následuje nasunutí chladicí příruby a zajištění šrouby. Do předvrtaného otvoru naplněného termopastou se vloží teplotní čidlo. Vyvedený kabel se zakryje krytkou a zajistí se šrouby.

Třetí podsestavou je sestava těla elektrovřetene. Do vnitřního otvoru těla elektrovřetene se vsune stator elektromotoru s instalovanými těsnícími kroužky. Poloha statoru je zajištěna sešroubováním se sestavou zadního víka. Zadní víko je opatřeno těsnícím kroužkem, vzájemná poloha vůči tělesu elektrovřetene je zajištěna kolíkem a následně sešroubováním. Jednotlivé otvory pro přívod médií v dělicí rovině jsou osazeny odpovídajícími těsnícími kroužky

Následuje osazení podsestav vřetena těsnícími kroužky na vnějším průměru a na dělicí rovině. Podsestava se vloží do tělesa elektrovřetena, vzájemná poloha je zajištěna kolíkem a stažena šrouby. Do předem vyvrtaného otvoru vyplněného termopastou se zasune teplotní čidlo. Kabel od čidla se vede příslušnými otvory do zadní části elektrovřetene. Dále je provedena montáž lamelového těsnícího kroužku do drážky ve vřetenu za použití předepsaného plastického maziva. Přes vnější průměr vřetene se nasune předem odlícované tělo těsnícího víka osazené těsnícím kroužkem na průměru a v dělicí roviny. Následně se montuje rozvodový prstenec s příložkou. Pomocí krytky a šroubů je zakrytována kabeláž předního čidla.

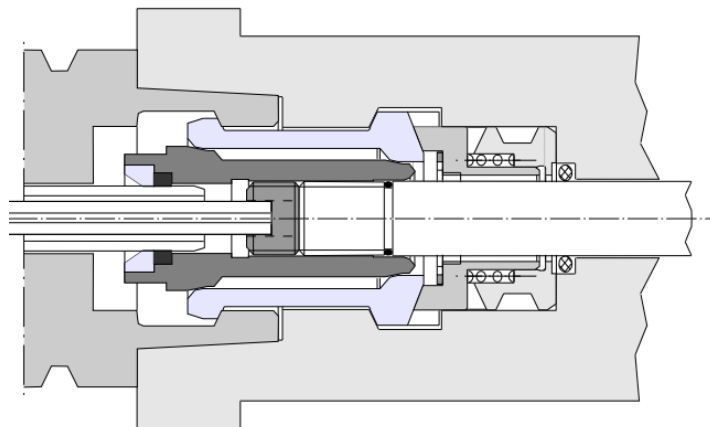
Do drážky adaptéru se naistaluje lamelový těsnící kroužek s předepsaným plastickým mazivem. Následuje montáž dvou pojistných šroubů tak aby celý šroub byl schován v těle adaptéru. Po našroubování adaptéru do vnitřního závitu vřetene a se polohující šrouby vyšroubují do drážek na vřeteni. Závity jsou zajištěny Loctite 244. Do příslušného osazení v zadním víku se namontuje senzor enkodéru. Příruba odepínací jednotky se vystředí na průměru zadního víka a spojí šrouby. Na zadní přírubu se namontují odpovídající kabelové průchodky a šroubení pro hydraulické a pneumatické rozvody.

Rotační převodník, odepínací jednotka, upínací kleština a upínací táhlo s předepsanou soustavou pružin je dodáváno firmou OTT-Jakob a jsou montovány dle podkladů firmou dodaných.

## 5.8 Upínací a uvolňovací mechanismus výměny nástrojů

### 5.8.1 Upínací kleština

Pro upínání nástrojů je použitý systém upínání HSK-63A od firmy OTT-JAKOB. Montáž, údržba a demontáž mechanismu je podrobně popsána v technických podkladech poskytovaných firmou. Mechanismus svou konstrukcí umožňuje automatickou výměnu nástrojů včetně osového chlazení. Hlavní výhodou mechanismu je že svým vnitřním uspořádáním a vhodnou volbou úkosových ploch zajišťuje samosvornost v upnutém stavu. Upínací síla je vyvozena centrálním táhlem osazeným talířovými pružinami. Pružiny mají požadovaný pracovní zdvih 17 mm s upínací silou 3600 N. K tomu slouží talířové pružiny o vnějším průměru 40 mm s vnitřním průměrem 14,2 mm o tloušťce 1,75 mm. Jejich upínací síla se násobí díky zkoseným hranám mechanismu, které slouží jako násobič síly, kterou zvětšují přibližně 3,5x na požadovanou sílu pro upnutí nástroje 12 kN. Lineárním pohybem této soustavy dochází k upnutí a uvolnění nástroje v dutině vřetene. V případě čištění je místo řezné kapaliny přiveden stlačený vzduch. [26]



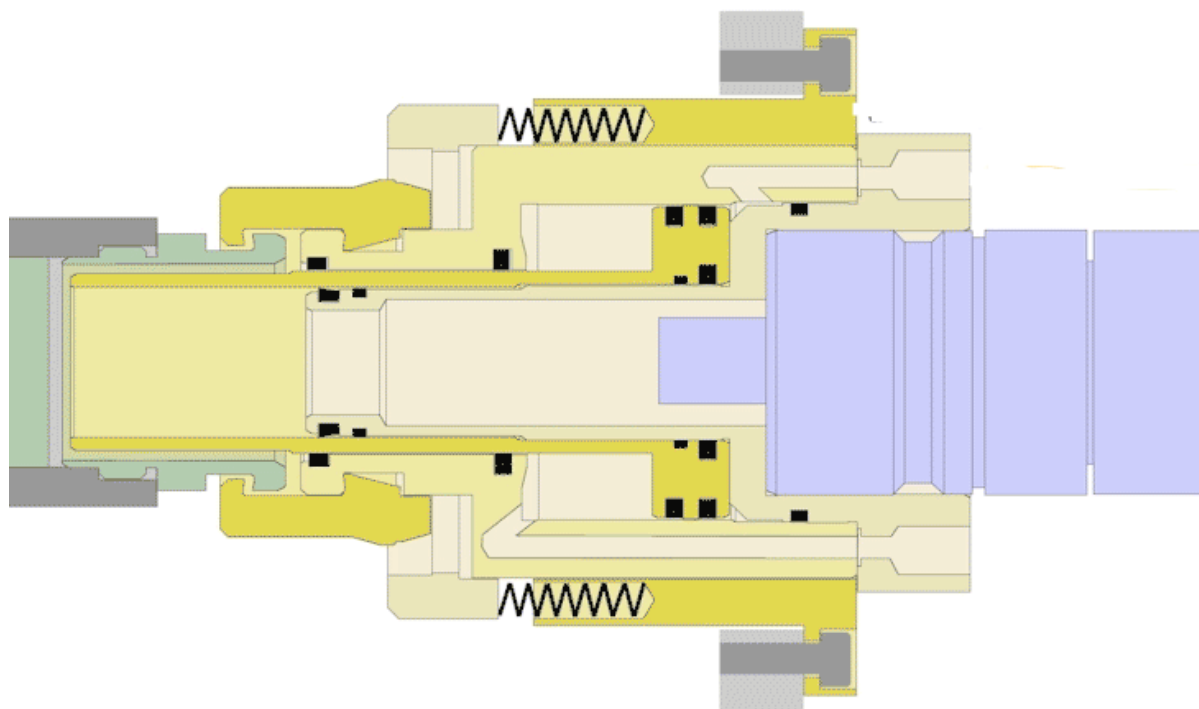
Obr. 41) Řez upínací kleštinou s koncem táhla [26]

### 5.9 Odepínací jednotka

Odepínací jednotka LE 95-B od firmy OTT-JAKOB slouží k uvolnění nástroje, upnutí nástroje a uložení rotačního převodníku médií. Hlavním nosným prvkem je vnější příruba, která je pevně spojena s nosným tělesem. V přední části příruby jsou otvory pro tlačné pružiny včetně drážky pro polohování vnitřního válce. Vnitřní válec je vsuvně uložen ve vnější přírubě, přední část tvoří uchycení odpružených klestiny. Kleštiny při uvolnění nástroje jsou v kontaktu s adaptérem, který je spojen s vřetenem. Vnitřní válec je v základní poloze je držen soustavou tlačných pružin, čímž je zaručena vůle mezi kleštinami a adaptérem. [26]

Tento mechanismus zaručuje že při uvolňování nástroje není vřeteno zatíženo osovou silou nutnou k stlačení talířových pružin. Při přívodu tlakového oleje nad uvolňovací píst dojde v první fázi k dotyku pístu se soustavou talířových pružin s táhlem, následně dojde k vymezení vůle mezi kleštinami a adaptérem a poté následuje stlačení talířových pružin včetně táhla, tím je realizován hlavní odepínací pohyb na upínací kleštině nástroje. V opačném případě je přiveden tlakový olej do prostoru pod píst, dojde k opačnému sledu událostí více popsaných a tím je nástroj upnut.

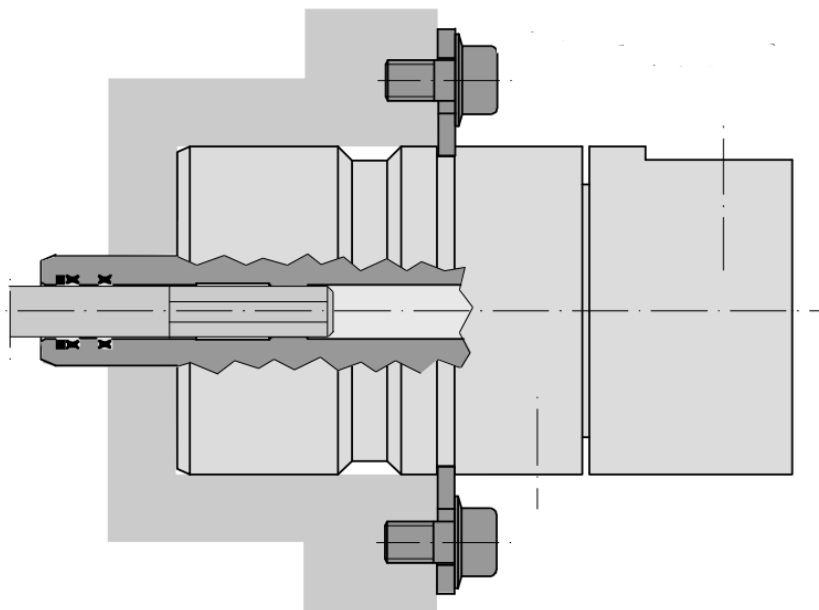
V zadní části vnitřního válce je přišroubováno vnitřní těleso, na kterém je uložen mechanismus rotačního převodníku médií. Soustava vnitřního válce a převodníku médií vykazuje pohyb 2 mm při procesu výměny nástroje z toho důvodu jen nutné realizovat pružné přívody médií, realizované hadicemi. Soustava talířových pružin a táhla je prodloužena trubkovým nástavcem ukončeným šestihranem ustící do rotačního převodníku médií pro přívod chladicí kapaliny a vzduchu. Dodavatel nabízí osazení mechanismu odepínací jednotky senzory snímající polohu upnutí nástroje, polohu pístu a senzor těsnosti.



Obr. 42) Řez odepínací jednotkou OTT-JAKOB [26]

### 5.9.1 Rotační převodník médií

Pro převod médií slouží převodník 1K-GD od firmy OTT-JAKOB. Převodník převádí média ze stacionární části stroje do rotujícího vřetene. Převodník je pevně spojen s vnitřním válcem odpínací jednotky a vykazuje posuv 2 mm při realizaci výměny nástroje. Rotační pohyb vnitřního hřídele je realizován soustavou speciálních těsnění. V přední části vnitřního hřídele je otvor opatřen těsnicími elementy, ve kterém se posouvá při výměně nástrojů trubkový nástavec ukončený šestihranem. Šestihran přenáší rotační pohyb na vnitřní hřídel rotačního převodníku médií.[26]



Obr. 43) Částečný řez převodníkem médií OTT-JAKOB [26]

## 5.10 Připojovací rozhraní

Pro připojení všech médií (vzduch, chlazení nástroje, chlazení motoru a ložiskového uložení, elektro silové a senzory) je realizováno pouze na zadní přírubě. Tím že jsou přívody vyvedeny na jednu plochu je usnadněná realizace montáže zákazníkem.

Přívod chlazení motoru a předního a zadního uložení vřetene je realizován společným přívodem vyústěným v zadní přírubě šroubením JS10 (závit M16x1,5). Vývod chlazení z motoru je realizován samostatně šroubením JS10 (M16x1,5) a vývod z uložení ložisek je realizován šroubením JS6 (M12x1,5).

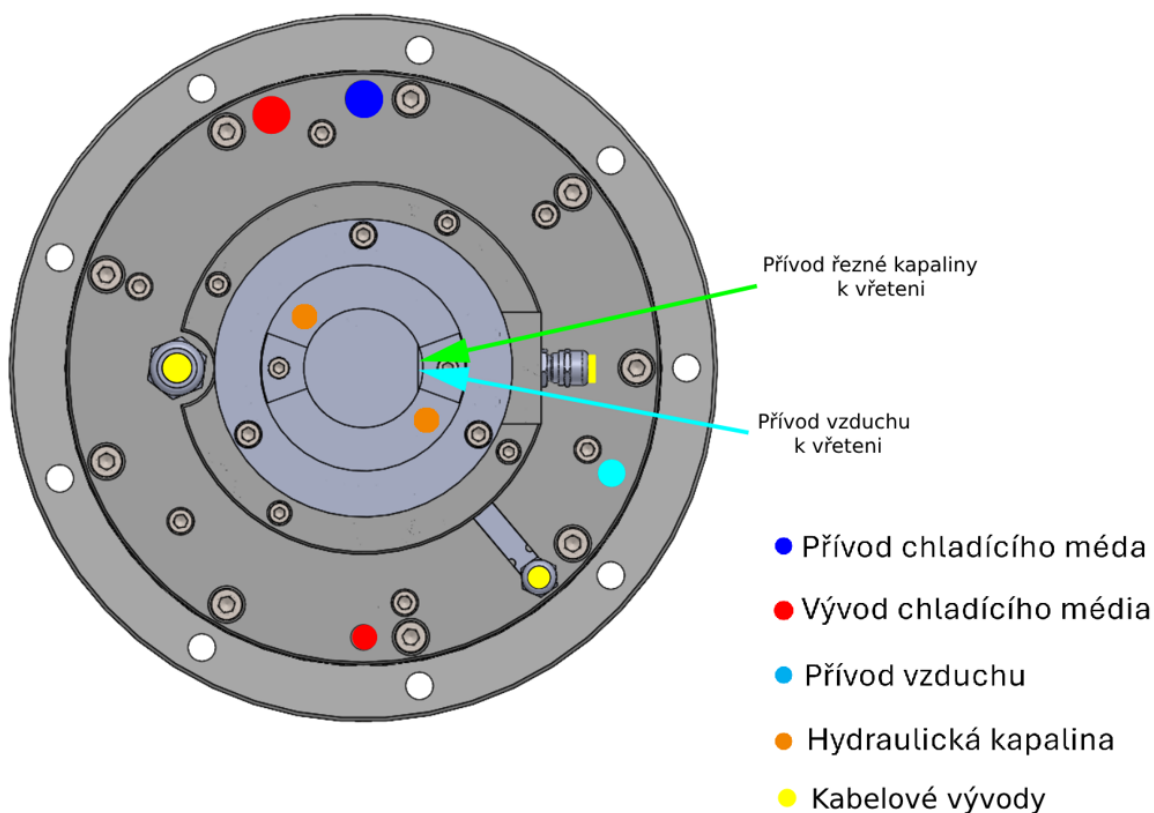
Přívod vzduchu pro vzduchové labyrintové těsnění je realizován přímým šroubením JS6 (M12x1,5).

Přívod větve vysokotlakého chlazení osou vřetene je realizován na rotačním převaděči od firmy OTT-Jakob T-šroubením G1/4“, sloužící k propojení chladicí kapaliny a vzduchu pro ofuk upínacího kužele nástrojů.

Přívod hydraulického oleje na funkci upnutí o odepnutí upínače nástrojů od firmy OTT-JAKOB je realizován přímým šroubením JS4 (M10x1)

Všechna použitá šroubení odpovídají normě DIN 3901

Pro vývod kabelů slouží tři kabelové průchodky, Průchodka M20 slouží pro vývod proudových kabelů motoru a kabelů senzoru teploty motoru. Další průchodka M12 slouží pro vývod kabelu od odčítání polohy vřetene a poslední pro vývod teplotních senzorů předního a zadního ložiska.



Obr. 44) Připojovací rozhraní elektrovřetene

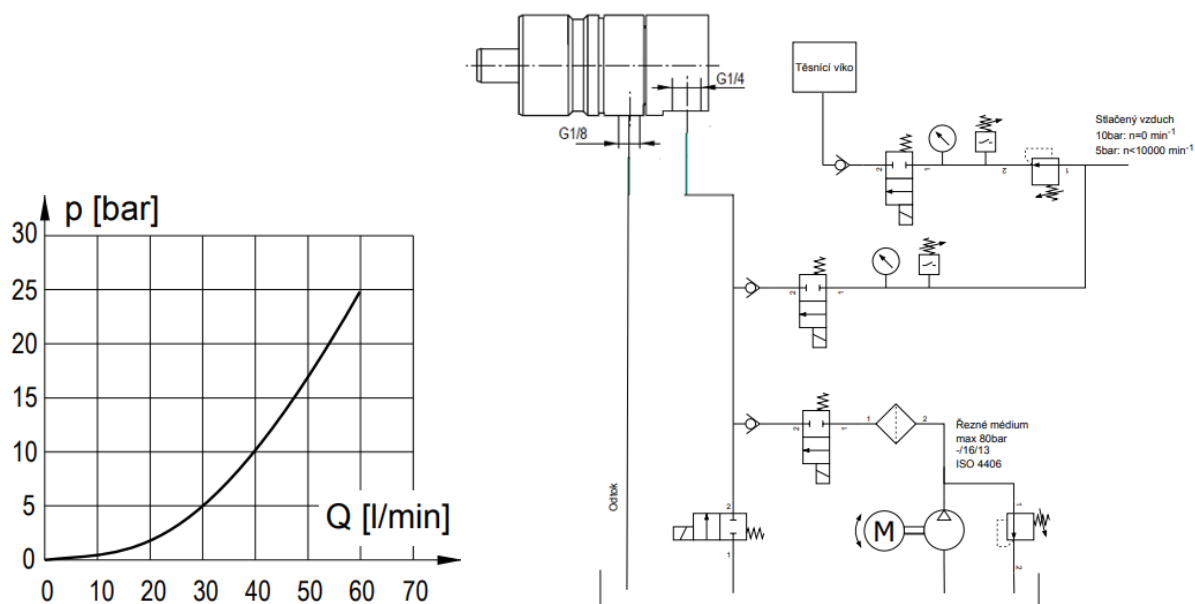
## 5.11 Požadavky na uživatele

Pro zabudování vřetene do zařízení je nutné mít k dispozici otvor 240 mm do hloubky 400 v toleranci H7 do hloubky minimálně 210 mm s čelní dosedací plochou obrobenu na minimální průměr 285 mm s tolerancemi házení vůči otvoru v 10 $\mu$ m. Na čelní ploše je devět závitových otvorů M10 úhlově po 40° na průměru 260 mm.

Pro funkci upínání je nutno zajistit přívod tlakového hydraulického oleje o parametrech. Pro funkci ofuku a čištění kuželové dutiny je nutné zajistit přívod vzduchu o parametrech: tlak 8bar, čistota dle ISO 4406 -/17/14.

Pro funkci osového chlazení je nutno zajistit řeznou kapalinu o čistotě dle ISO 4406 -/16/13 a tlaku max 80bar. Průtok je v závislosti na tlaku dle grafu níže. Okruh rozvodu médií pro osové chlazení/ofuk je nutné zapojit dle schématu níže dodávaného výrobcem rotačního převodníku[26]

(OTT-JAKOB). Lubrikační větev zapojení není v našem případě používána.



Obr. 45) Závislost tlaku na průtoku (vlevo), zapojení rotačního převodníku (vpravo)[26]

V případě nutnosti vnějšího chlazení nástrojů zákazník zajistí kompletní přívod včetně vyústění ohebnou hadicí s kohoutem.

Regulační jednotka těsnícího víka bude připojena na výše uvedený vzduchový přívod paralelně s regulační jednotkou rotačního převodníku. Kontinuální odběr vzduchu víkem je 2,46l/s.

## 5.12 Požadavky na chlazení

Po konzultaci s firmou HYTEC je doporučen chladicí výkon okolo 20% výkonu vřetene v tomto případě je doporučený chladicí výkon 2kW, jako chladicí médium je doporučena voda s obsahem 10% glykolu o tlaku 2-4 bar s průtokem 6,5l/min s teplotou 20-25°C. Těmto požadavkům vyhovuje chiller TAL 24 NMSBA od firmy nVent Hoffman s následujícími parametry. [27]

Tab 15) Parametry chilleru

Parametr	Hodnota	Jednotka
Chladicí výkon	2300	W
Typ média	Voda	-
Průtok	7-18	l/min
Tlak	3,8	bar
Objem nádrže	50	l
Váha	151	kg



Obr. 46) Chiller nVent/Hoffman TAL 24 [27]

## 6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Dle zadání bylo ve vřetení použito upínání nástrojů HSK, po návrhu hlavních technologických operací bylo zvoleno upínání HSK A63. Později v konstrukční části práce vzešlo najevo že tento zvolený rozměr upínání potřebuje pro uložení upínacího mechanismu větší rozměr vnitřní díry, než umožňovali navržená ložiska pro dané technologické operace. Bylo proto nutné zvolit ložiska s větším vnitřním průměrem a z toho důvodu jsou výrazně předimenzované. Možné řešení tohoto problému by bylo zvolit menší rozměr upínání HSK, například A50 s menšími rozměry upínacího kužele i odepínacího systému. Nevýhodou tohoto řešení by byla snížená tuhost upnutí nástroje za cenu kompaktnějšího a vhodně dimenzovaného uložení.

Přední ložiskové uložení je realizováno vložením ložisek do ložiskové příruby a následným vložením příruby do těla elektrovřetene z důvodu realizace chladících kanálků pro přední uložení. To může mít za následek snížení tuhosti při obrábění a obecně přesnost předního ložiskového uložení. Toto by bylo možné eliminovat spojením těla vřetene s ložiskovou přírubou s přesahem za tepla a následným obrobením funkčních ploch, těsnící kroužky by bylo nutné použít silikonové kvůli vysoké teplotě při montáži. Tímto by se dosáhlo tužšího a přesnějšího uložení. Nevýhodou by naopak byla nerozebíratelnost spojení.

Výroba součástí vřetene se odvíjí od požadavků na přesnost udávaných výrobcem ložisek a upínacího systému nástroje. Pro vysoce přesná vřetenová ložiska uvádí výrobce třídu přesnosti IT1 až IT2. V této třídě přesnosti byly navrhovány všechny části elektrovřetene ovlivňující přesnost obrábění. Vzešlá požadovaná přesnost součástí elektrovřetene bude mít značný dopad na cenu výroby. V některých případech zvýšená tolerance dílů neovlivňuje výslednou přesnost elektrovřetene. Nastává tedy otázka, zda je nutné striktně dodržovat doporučené tolerance a přesnosti od výrobců komponent nebo v odůvodněných případech z těchto nároků slevit.

Celkově se elektrovřeteno jeví jako validní možnost v nabídce dostupných vřeten na trhu. Nabízí poměrně velký krouticí moment na prostor zástavby, velkou výkonovou hustotu a nenáročné požadavky na zakomponování do stroje.



## 7 ZÁVĚR

Práce se zabývala konstrukcí vřetene frézovacího centra o výkonu 10kW a automatickou výměnnou nástroje. V první části byla provedena rešerše popisující jednotlivé části vřeten možná řešení jednotlivých problémů konstrukce a rozbor existujících řešení dostupných na trhu.

V další kapitole byly zvoleny dodatečné požadované parametry na vřeteno z důvodu obecného zadání diplomové práce. Na základě těchto a zadaných parametrů byly navrženy 4 možné koncepční řešení daného problému. Ke každému řešení byl uveden jeho popis a stručné výhody a nevýhody. Na tomto základě a z informací získaných z rešerše byla provedena multikriteriální analýza. Po vyhodnocení analýzy vyšla jako nejvhodnější varianta 4. Elektrovřeteno, které bude nadále zpracovááno.

Dále v kapitole Návrh klíčových uzlů byly navrženy a nadimenzovány prvky vřetene které přímo či nepřímo vychází z konstrukčních výpočtů. Jako výchozí technologické operace byly zvoleny hrubovací frézování a vrtání. Při všech výpočtech bylo uvažováno že operace je krajní případ zatěžování motoru a ložisek, tzn. že technologie zatěžuje motor na horní hranici S1 a vřeteno nepřetržitě odpovídající maximální možnou řeznou silou. Z této úvahy a výpočtu byl zvolen motor Siemens SIMOTICS řady M-1FE1 o výkonu 10kW jmenovitém momentu 27Nm a jmenovitých otáčkách 3500 min<sup>-1</sup>.

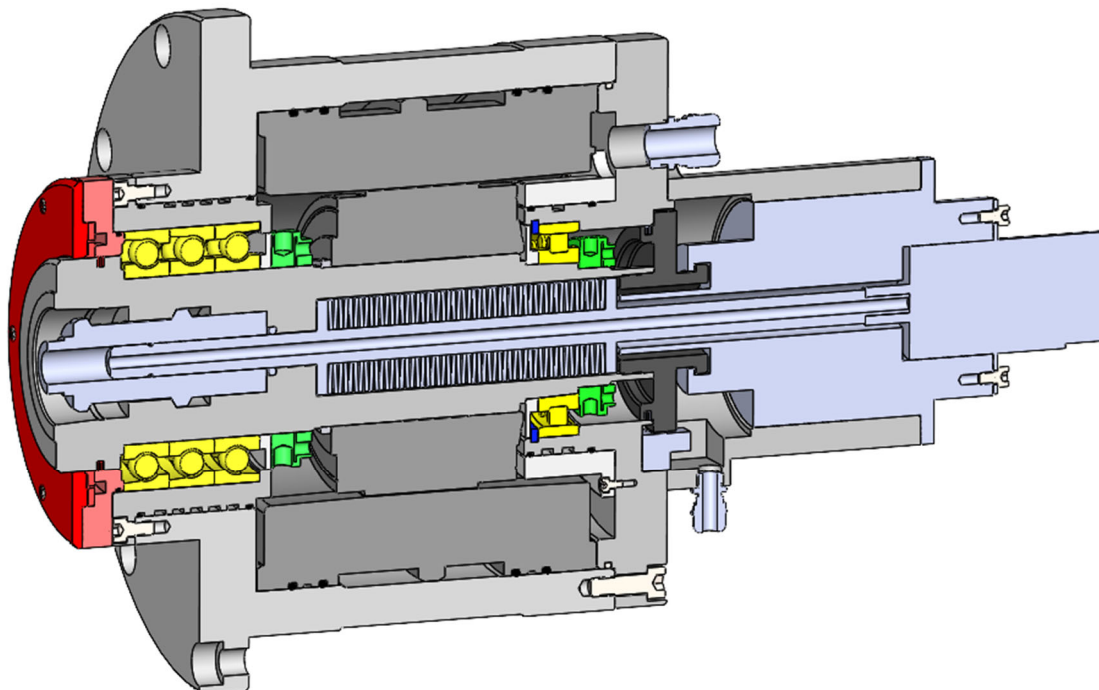
Ložiska byla využita od firmy SKF z řady vysoce přesných kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem 7014 s kontaktním úhlem 25° v uspořádání TBT. Ložisko v zadní části je jednořadé válečkové ložisko řady N1011. Ložiska by bylo možné z hlediska životnosti zvolit menšího průměru, ovšem po zakomponování upínacího systému nástroje a minimálního rozměru rotoru bylo nutné z důvodu požadovaných rozměrů díry pro upínací systém zvolit ložiska větších než potřebných rozměrů. K ložiskům byl určen domazávací interval. Byla také zkontrolována tuhost vřetene pomocí analytického výpočtu. Pro výpočet bylo vřeteno zjednodušeno na pět oblastí různých průřezů. Výsledná tuhost vyšla 132 N/ $\mu$ m.

Následná konstrukce vycházela z podmínek vzešlých z předchozí kapitoly a z nakupovaných komponentů jako upínací systém, motor atd. Z toho vznikli dodatečné požadavky, kterými se konstrukce řídila. Pro utěsnění ložisek a vřetena samotného byly na obou koncích vřetene použity lamelové těsnící kroužky od firmy FEY, v přední části bylo s lamelovým kroužkem použito i vzduchové těsnění. Tryskající vzduch je usměřován po obvodu vřetene směrem od lamelového kroužku a ložiska, tím zabraňuje vniknutí nečistot z pracovní oblasti. V této kapitole byl popsán i montážní postup, schéma připojovacího rozhraní, implementace nakupovaného upínání nástrojů a požadavky na zákazníka potřebné pro provoz vřetene.

Výsledkem diplomové práce je kompaktní vestavené frézovací elektrovřeteno o výkonu 10kW s automatickou výměnou nástrojů HSK A64 a přívodem chladicí kapaliny středem nástroje osazené sadou diagnostických čidel. Vřeteno se svou velikostí a výkonem řadí do kategorie malých obráběcích strojů.

Tab 16) Výsledné parametry vřetene

Hodnota		Hodnota	Jednotka
Výkon vřetene	P	10	kW
Moment vřetene	$M_n$	27	Nm
Maximální moment vřetene	$M_{max}$	51	Nm
Otáčky maximální	$n_{max}$	7000	$min^{-1}$
Otáčky jmenovité	$n_n$	3500	$min^{-1}$
Tuhost vřetene	$\delta_c$	132	$N/\mu m$
Průměr pod předními ložisky	d	70	mm
Délka zástavby	L	270 (466)	mm
Průměr zástavby	D	240	mm
Domazávací interval	-	10 000	hod
Upínání nástrojů	-	HSK A64	
Typ mazání	-	Plastickým mazivem	



Obr. 47) Výsledné elektrovřeteno

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. III. Praha: MM publishing, 2014. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [2] *Kessler-Group*. Online. Kessler-Group. 2025. Dostupné z: [https://kessler-group.biz/files/images/2\\_Kessler/7\\_Downloads/Broschueren\\_2025/BRO\\_PK1006\\_Kessler\\_Spindel\\_V\\_line\\_A4\\_en\\_V5-0\\_WEB\\_2.0.pdf](https://kessler-group.biz/files/images/2_Kessler/7_Downloads/Broschueren_2025/BRO_PK1006_Kessler_Spindel_V_line_A4_en_V5-0_WEB_2.0.pdf). [cit. 2025-05-21].
- [3] AB SKF. *Vysoce přesná ložiska*. I. 2015. Dostupné také z: [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196804385f4/pdf\\_preview\\_medium/0901d196804385f4\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196804385f4/pdf_preview_medium/0901d196804385f4_pdf_preview_medium.pdf).
- [4] *Valivá ložiska*. Online. In: SKF. 2025. Dostupné z: [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968096351e/pdf\\_preview\\_medium/0901d1968096351e\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968096351e/pdf_preview_medium/0901d1968096351e_pdf_preview_medium.pdf). [cit. 2025-05-21].
- [5] ZKL GROUP A.S. *Mazání ložisek*. Online. ZKL GROUP A.S. Mazání ložisek. 2024. Dostupné z: <https://www.zkl.cz/cs/produkty/obecne-informace-pro-konstruktery/9-mazani-lozisek>. [cit. 2025-01-03].
- [6] SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R a BUDYNAS, Richard G, VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. Překlady vysokoškolských učebnic. V Brně: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [7] SIEMENS AG. *1FE1/1FE2 synchronous built-in motors*. Online. 2025. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10283157?tree=CatalogTree#Application>. [cit. 2025-05-21].
- [8] OMLAT MECHATRONICS SRL. *Electrospindles DELTA 12*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.omlat.com/en/products/electrospindles/160/delta-12>. [cit. 2025-05-21].
- [9] SANDVIK COROMANT. *How to choose a machine spindle*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/spindle-selection>. [cit. 2025-01-04].
- [10] RÖHM GMBH SONTHEIM. *HSK SUPER-LOCK*. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.roehm.biz/en/products/tool-clamping-systems/hsk-super-lock/>. [cit. 2025-01-04].
- [11] RAVEO. *Držák nástroje ISO30*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/vretenove-motory-prislusenstvi-drzak-nastroje-iso30-er32/>. [cit. 2025-05-21].

- [12] *Metal HSK Tool Holder*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.exportersindia.com/product-detail/metal-hsk-tool-holder-1746777621.htm>. [cit. 2025-05-21].
- [13] KENNAMETAL. *HTS-KM4X*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/jp/ja/products/fam.hts-km4x.100001696.html>. [cit. 2025-05-21].
- [14] AB SKF. *Systémy pro monitorování stavu*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/condition-monitoring-systems>. [cit. 2025-01-04].
- [15] NSK LTD. *High-speed Integrated Motor Spindle for Machining Centers*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.nsk.com/content/dam/nsk/common/catalogs/ctrGpdf/precision/e2204.pdf>. [cit. 2025-05-23].
- [16] ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. *Ocel 14 220*. Online. 2005. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/database/ocel\\_14220.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/database/ocel_14220.pdf). [cit. 2025-05-21].
- [17] INDIAMART. *SETCO 102A DIRECT DRIVE MILLING SPINDLE*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/102a-direct-drive-milling-spindle-22886416848.html>. [cit. 2025-05-21].
- [18] NIDEC DESCH ANTRIEBSTECHNIK GMBH & CO. KG. *DESCH DRIVE- AND SYSTEM SOLUTIONS*. Online. Dostupné z: [https://www.desch.com/files/default/pdf/products/en/DESCH\\_WM\\_19\\_Machine%20Tools\\_GB.pdf](https://www.desch.com/files/default/pdf/products/en/DESCH_WM_19_Machine%20Tools_GB.pdf). [cit. 2025-05-21].
- [19] OMLAT MECHATRONICS SRL. *Electrospindles OMC 140 - S24*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.omlat.com/en/products/electrospindles/191/omc-140-s24>. [cit. 2025-05-21].
- [20] SANDVIK COROMANT SWEDEN. *Inserts*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/tools/inserts-grades>. [cit. 2025-05-21].
- [21] *Schaeffler AG*. Online. 2025. Dostupné z: <https://medias.schaeffler.cz/cs/knowledge-center/rolling-bearings/design-of-bearing-arrangements#22225487243>. [cit. 2025-05-21].
- [22] FEY LAMELLENRINGE GMBH & CO. *FK 3 AS Single laminar sealing rings*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.fey-lamellenringe.de/index.php/en/products/products/fk-3-as.html?showall=1>. [cit. 2025-05-21].
- [23] NASA. *Mass Flow Choking*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mflchk.html>. [cit. 2025-05-21].
- [24] DWYER INSTRUMENTS, LLC. *Thermocouples 5TC-TT-T-24-120*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.dwyeromega.com/en-us/ready-made-insulated-thermocouples/5TC/p/5TC-TT-T-24-120>. [cit. 2025-05-21].
- [25] LENORD, BAUER & CO. GMBH. *MiniCODER*. Online. 2025. Dostupné z: <https://saleslib.lenord.de/s/RnKt6KWp2CECSYF>. [cit. 2025-05-22].

- [26] OTT-JAKOB SPANNTTECHNIK GMBH. *OTT-JAKOB Infothek*. Online. 2025. Dostupné z: <https://infothek.ott-jakob.de/index.php?lang=en&k=24>. [cit. 2025-05-22].
- [27] NVENT HOFFMAN. *Water Chiller 2300W TAL24*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.nvent.com/en-us/hoffman/products/enctal24>. [cit. 2025-05-22].



## 9 SEZNAM SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

### 9.1 Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
HB	Tvrдость podle Brinella	-
V <sub>C</sub>	Řezná rychlost	[m/min]
F	Posuv na zub	[mm]
D <sub>n</sub>	Průměr nástroje	[mm]
K <sub>C</sub>	Měrný řezný odpor	[N/mm <sup>2</sup> ]
a <sub>p</sub>	Hloubka řezu	[mm]
F <sub>C</sub>	Řezná síla	[N]
F <sub>f</sub>	Pasivní síla	[N]
F <sub>p</sub>	Axiální/posuvná síla	[N]
M <sub>C</sub>	Řezný moment	[Nm]
n <sub>v</sub>	Otáčky při vrtání	[min <sup>-1</sup> ]
M <sub>k</sub>	Vrtací moment	[Nm]
η <sub>kos</sub>	Účinnost ložiska s kosoúhlým stykem	-
η <sub>val</sub>	Účinnost válečkového ložiska	-
η <sub>c</sub>	Celková účinnost	-
M <sub>m</sub>	Moment motoru	[Nm]
l <sub>n</sub>	Vzdálenost mezi čelem vřetene a působištem řezné síly	[mm]
l <sub>1</sub>	Vzdálenost mezi středem předního uložení a čelem vřetene	[mm]
l <sub>2</sub>	Vzdálenost mezi středem předního uložení a středem válečkového ložiska	[mm]
F <sub>AX</sub>	Síla v bodě A v ose X	[N]
F <sub>AY</sub>	Síla v bodě A v ose Y	[N]
F <sub>AZ</sub>	Síla v bodě A v ose Z	[N]
F <sub>BX</sub>	Síla v bodě B v ose X	[N]
F <sub>BY</sub>	Síla v bodě B v ose Y	[N]
F <sub>A</sub>	Celková síla v bodě A	[N]
F <sub>B</sub>	Celková síla v bodě B	[N]
C	Základní dynamická únosnost	[kN]
C <sub>0</sub>	Základní statická únosnost	[kN]
f <sub>0</sub>	Výpočtový součinitel	-
f	Opravný součinitel velikosti ložiska	-
f <sub>1</sub>	Opravný součinitel stykového úhlu	-

$f_{2B}$	Opravný součinitel předpětí	-
$f_{HC}$	Opravný součinitel hybridních ložisek	-
$G_B$	Předpětí	[N]
$K_a$	Vnější axiální síly	[N]
$F_a$	Axiální složka zatěžování ložiska	[N]
$G_m$	Předeprnutí v sadě ložisek	[N]
$F_r$	Radiální síla v ložisku	[N]
$e$	Součinitel zatížení ložisek	-
$P$	Ekvivalentní zatížení	[]
$L_A$	Životnost ložiska A	[hod]
$L_B$	Životnost ložiska B	[hod]
$t_{fA}$	Domazávací interval pro ložisko A	[hod]
$t_{fB}$	Domazávací interval pro ložisko B	[hod]
$C_1$	Opravný součinitel pro sady ložisek a různé třídy předpětí	-
$C_2$	Opravný součinitel hybridních ložisek	-
$C_3$	Opravný součinitel provozních podmínek	-
$C_4$	Opravný součinitel zatížení ložiska	-
$C_5$	Opravný součinitel spolehlivosti	-
$C_6$	Opravný součinitel proudění vzduchu ložiskem	-
$C_7$	Opravný součinitel vlhkosti a prachu	-
$C_8$	Opravný součinitel provozní teploty	-
$T_{fA}$	Mazací interval pro ložisko A upravený provozními činiteli	[hod]
$T_{fB}$	Mazací interval pro ložisko B upravený provozními činiteli	[hod]
$A$	Otáčkové číslo	[mm/min]
$I_a$	Kvadratický moment v oblasti A	[mm <sup>4</sup> ]
$I_b$	Kvadratický moment v oblasti B	[mm <sup>4</sup> ]
$I_c$	Kvadratický moment v oblasti C	[mm <sup>4</sup> ]
$I_d$	Kvadratický moment v oblasti D	[mm <sup>4</sup> ]
$I_e$	Kvadratický moment v oblasti E	[mm <sup>4</sup> ]
$x_a$	Velikost oblasti A	[mm]
$x_{b1}$	Velikost oblasti B <sub>1</sub>	[mm]
$x_{b2}$	Velikost oblasti B <sub>2</sub>	[mm]
$x_c$	Velikost oblasti C	[mm]
$x_d$	Velikost oblasti D	[mm]
$x_e$	Velikost oblasti E	[mm]
$w$	Průhyb vřetene	[μm]
$\delta_V$	Průhyb vřetene	[μm]
$k_{ax}$	Axiální tuhost	[N/μm]
$k_{rA}$	Radiální tuhost ložiska A	[N/μm]

$\delta_A$	Deformace ložisek A	[ $\mu\text{m}$ ]
$k_{rB}$	Radiální tuhost ložiska B	[N/ $\mu\text{m}$ ]
$\delta_B$	Deformace ložisek B	[ $\mu\text{m}$ ]
$\delta_{AB}$	Průhyb na čele vřetene od deformace ložisek	[ $\mu\text{m}$ ]
$\delta_C$	Celkový průhyb vřetene	[ $\mu\text{m}$ ]
$\delta_T$	Deformace těla vřetene	[ $\mu\text{m}$ ]
$k_c$	Celková tuhost vřetene	[N/ $\mu\text{m}$ ]
$\dot{m}$	Hmotnostní průtok	[kg/s]
S	Průřez otvorů ve víku	[ $\text{mm}^2$ ]
p	Tlak	[bar]
T	Teplota	[K]
R	Plynová konstanta vzduchu	[J/kg·K]
$\rho$	Hustota vzduchu při 20°C	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\kappa$	Poissonova konstanta	-
Q	Objemový průtok	[l/s]
P	Výkon vřetene	[kW]
$M_n$	Moment vřetene	[Nm]
$M_{\max}$	Maximální moment vřetene	[Nm]
$n_{\max}$	Otáčky maximální	[min <sup>-1</sup> ]
$n_n$	Otáčky jmenovité	[min <sup>-1</sup> ]
$\delta_C$	Tuhost vřetene	[N/ $\mu\text{m}$ ]
d	Průměr pod předními ložisky	[mm]
L	Délka zástavby	[mm]
D	Průměr zástavby	[mm]

## 9.2 Seznam tabulek

<b>TAB 1)</b>	<b>VÝPIS VLASTNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH ZPŮSOBŮ MAZÁNÍ.....</b>	<b>21</b>
<b>TAB 2)</b>	<b>PARAMETRY VŘETEN.....</b>	<b>32</b>
<b>TAB 3)</b>	<b>VLASTNOSTI OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU [16] .....</b>	<b>33</b>
<b>TAB 4)</b>	<b>KRITÉRIA HODNOCENÍ A JEJICH VÁHA .....</b>	<b>36</b>
<b>TAB 5)</b>	<b>HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KONCEPČNÍCH NÁVRHŮ.....</b>	<b>36</b>
<b>TAB 6)</b>	<b>FRÉZOVACÍ NÁSTROJ A VBD [20].....</b>	<b>37</b>
<b>TAB 7)</b>	<b>ŘEZNÉ PARAMETRY FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE [20] .....</b>	<b>37</b>
<b>TAB 8)</b>	<b>VRTACÍ NÁSTROJ A VBD [20].....</b>	<b>39</b>
<b>TAB 9)</b>	<b>ŘEZNÉ PARAMETRY VRTACÍHO NÁSTROJE [20] .....</b>	<b>39</b>
<b>TAB 10)</b>	<b>PARAMETRY ZVOLENÉHO MOTORU [7] .....</b>	<b>40</b>
<b>TAB 11)</b>	<b>PARAMETRY PŘEDNÍHO LOŽISKA .....</b>	<b>46</b>

TAB 12) PARAMETRY ZADNÍHO LOŽISKA.....	47
TAB 13) VELIKOSTI OBLASTÍ A JEJICH KVADRATICKÉ MOMENTY .....	53
TAB 14) HODNOTY PRO VÝPOČET .....	58
TAB 15) PARAMETRY CHILLERU.....	68
TAB 16) VÝSLEDNÉ PARAMETRY VŘETENE.....	72

### 9.3 Seznam obrázků

OBR. 1) ELEKTROVŘETENO KESSLER MT80 [2], (VLEVO), SKŘÍŇOVÉ VŘETENO V (VPRAVO)[1].....	17
OBR. 2) USPOŘÁDÁNÍ KOSOÚHLÝCH LOŽISEK Z LEVA DO „X“ DO „O“ A DO TANDEMU[3] .....	18
OBR. 3) VÁLEČKOVÉ JEDNOŘADÉ LOŽISKO (VLEVO), VÁLEČKOVÉ DVOUŘADÉ LOŽISKO (VPRAVO)[3].....	19
OBR. 4) PROFIL KUŽELÍKOVÉHO LOŽISKA[4] .....	19
OBR. 5) USPOŘÁDÁNÍ LOŽISEK A JEJICH VLASTNOSTI [1].....	20
OBR. 6) GUFERO (VLEVO), BEZKONTAKTNÍ TĚSNĚNÍ LABYRINTEM (VPRAVO)[3] .....	22
OBR. 7) SČÍTÁNÍ HÁZENÍ LOŽISEK NA ČELE VŘETENA[1].....	23
OBR. 8) TUHOSTI JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT VŘETENE[1].....	23
OBR. 9) STATOR A ROTOR VESTAVĚNÉHO ELEKTROMOTORU[7] .....	24
OBR. 10) VŘETENO ŘADY BELT-M S NÁHONEM PŘES ŘEMEN OD FIRMY OMLAT[8].....	25
OBR. 11) HLAVNÍ ČÁSTI UPÍNACÍHO SYSTÉMU NÁSTROJŮ[10] .....	26
OBR. 12) ISO KUŽEL URČENÝ PRO AUTOMATICKÝ VÝMĚNÍK [11] .....	26
OBR. 13) UPÍNACÍ KUŽEL HSK TYP A [12] .....	27
OBR. 14) UPÍNACÍ SYSTÉM COROMANT CAPTO [9].....	28
OBR. 15) UPÍNACÍ SYSTÉM KM4X [13] .....	28
OBR. 16) VEDENÍ MÉDIÍ VŘETENEM A DRŽÁKEM NÁSTROJE [1] .....	29
OBR. 17) ELEKTROVŘETENO KESSLER ŘADA V100 [2] .....	30
OBR. 18) SKŘÍŇOVÉ ELEKTROVŘETENO OMLAT DELTA 12 [8].....	31
OBR. 19) VŘETENO S PŘÍMÝM NÁHONEM PŘES SPOJKU[17] .....	34
OBR. 20) VŘETENO S VLOŽENÝM PŘEVODEM DESCH DENOX HS[18] .....	34
OBR. 21) VŘETENO S ŘEMENOVÝM PŘEVODEM [1].....	35
OBR. 22) ELEKTROVŘETENO OMLAT OMC, ZADNÍ PŘIPOJOVACÍ ROZHRANÍ [19].....	35
OBR. 23) MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA ZVOLENÉHO MOTORU [7] .....	40
OBR. 24) VZDÁLENOSTI PŮSOBÍCÍCH SIL NA VŘETENO.....	41

OBR. 25) PROSTOROVĚ ZNÁZORNĚNÉ PŮSOBENÍ REAKČNÍCH A ŘEZNÝCH SIL.....	41
OBR. 26) SÍLY PŮSOBÍCÍ V ROVINĚ Z-X .....	41
OBR. 27) SÍLY PŮSOBÍCÍ V ROVINĚ Z-Y .....	42
OBR. 28) POROVNÁNÍ MOŽNÝCH VARIANT USPOŘÁDÁNÍ LOŽISEK [3]..	44
OBR. 29) USPOŘÁDÁNÍ LOŽISEK „TBT“ .....	45
OBR. 30) DOMAZÁVACÍHO INTERVAL PRO KOSOÚHLÉ LOŽISKA DLE SKF [3] 49	
OBR. 31) DOMAZÁVACÍ INTERVAL PRO VÁLEČKOVÉ LOŽISKO DLE SKF [3] 51	
OBR. 32) ROZMĚRY PRŮŘEZŮ ZJEDNODUŠENÉHO VŘETENE .....	52
OBR. 33) SCHÉMA PŮSOBENÍ PRŮHYBŮ NA VŘETENO .....	55
OBR. 34) ČÁSTEČNÝ ŘEZ PŘEDNÍHO LOŽISKOVÉHO ULOŽENÍ .....	56
OBR. 35) ČÁSTEČNÝ ŘEZ TĚSNÍCÍHO VÍKA .....	57
OBR. 36) ČÁSTEČNÝ ŘEZ ZADNÍHO ULOŽENÍ.....	59
OBR. 37) ŘEZ VŘETENE .....	60
OBR. 38) ŘEZ TĚLEM ELEKTROVŘETENA.....	60
OBR. 39) TERMOČLÁNKY DWAEROMEGA [24].....	61
OBR. 40) MAGNETOREZISTIVNÍ SENZOR (VLEVO) ODČÍTACÍ KOLO (VPRAVO) [25].....	61
OBR. 41) ŘEZ UPÍNACÍ KLEŠTINOU S KONCEM TÁHLA [26] .....	63
OBR. 42) ŘEZ ODEPÍNACÍ JEDNOTKOU OTT-JAKOB [26] .....	64
OBR. 43) ČÁSTEČNÝ ŘEZ PŘEVODNÍKEM MÉDIÍ OTT-JAKOB [26].....	65
OBR. 44) PŘIPOJOVACÍ ROZHRANÍ ELEKTROVŘETENE.....	66
OBR. 45) ZÁVISLOST TLAKU NA PRŮTOKU (VLEVO), ZAPOJENÍ ROTAČNÍHO PŘEVODNÍKU (VPRAVO)[26] .....	67
OBR. 46) CHILLER NVENT/HOFFMAN TAL 24 [27].....	68
OBR. 47) VÝSLEDNÉ ELEKTROVŘETENO .....	72



## 10 SEZNAM PŘÍLOH

### Příloha A:

A1: Elektrovřeteno pohled boční

A2: Elektrovřeteno pohled přední

A3: Elektrovřeteno pohled zadní

### Příloha B:

B1: 2-DP-1/1 - Výkres sestava elektrovřetene

B2: 2-DP-1/2 – Kusovník sestavy elektrovřetene

B3: 2-DP-2 – Výkres Zadní příruba

B3: 2-DP-3 – Výkres Tělo vřeteníku

B3: 2-DP-4 – Výkres vřetene

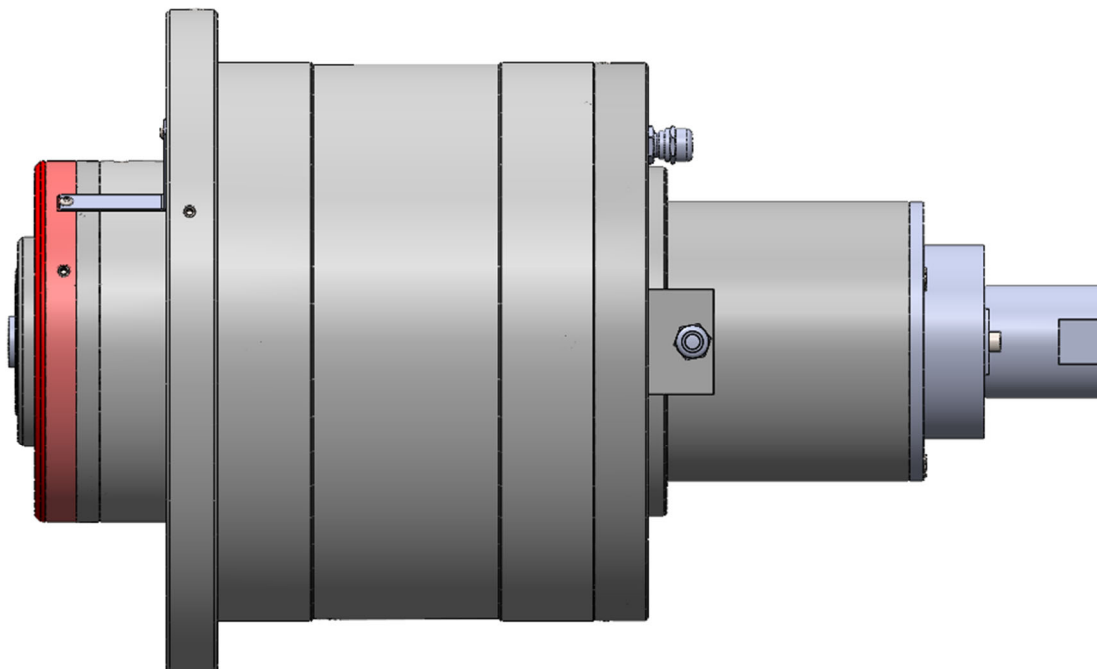
### Příloha C:

C1: Model Elektrovřetene

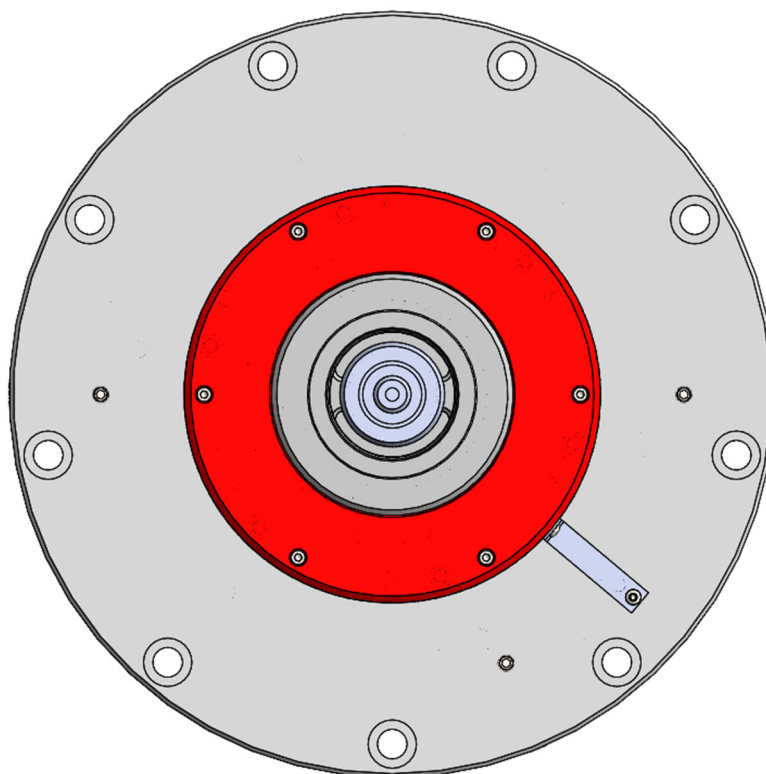


## PŘÍLOHY

Příloha A-1: Elektrovřeteno pohled boční



Příloha A-2: Elektrovřeteno pohled přední



Příloha A3: Elektrovřeteno pohled zadní

