



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

Katedra konstruování strojů
Fakulta strojní

KKS/KVS, KOS

Uložení vřetene - příklady

Zdeněk Hudec



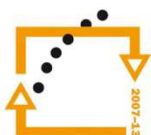
evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

verze - 1.0

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

Hledáte kvalitní studium?

Nabízíme vám jej na Katedře konstruování strojů

Katedra konstruování strojů je jednou ze šesti kateder Fakulty strojní na Západočeské univerzitě v Plzni a patří na fakultě k největším. Fakulta strojní je moderní otevřenou vzdělávací institucí uznávanou i v oblasti vědy a výzkumu uplatňovaného v praxi.

Katedra konstruování strojů disponuje moderně vybavenými laboratořemi s počítačovou technikou, na které jsou např. studentům pro studijní účely neomezeně k dispozici nové verze předních CAD (Pro/Engineer, Catia, NX) a CAE (MSC Marc, Ansys) systémů. Laboratoře katedry jsou ve všední dny studentům plně k dispozici např. pro práci na semestrálních, bakalářských či diplomových pracích, i na dalších projektech v rámci univerzity apod.

Kvalita výuky na katedře je úzce propojena s celouniverzitním systémem hodnocení kvality výuky, na kterém se průběžně, zejména po absolvování jednotlivých semestrů, podílejí všichni studenti.

V současné době probíhá na katedře konstruování strojů významná komplexní inovace výuky, v rámci které mj. vznikají i nové kvalitní učební materiály, které budou v nadcházejících letech využívány pro podporu výuky. Jeden z výsledků této snahy máte nyní ve svých rukou.

V rámci výuky i mimo ni mají studenti možnost zapojit se na katedře také do spolupráce s předními strojírenskými podniky v plzeňském regionu i mimo něj. Řada studentů rovněž vyjíždí na studijní stáže a praxe do zahraničí.

Nabídka studia na katedře konstruování strojů:

Bakalářské studium (3roky, titul Bc.)		
Studijní program	B2301: strojní inženýrství („zaměřený univerzitně“)	B2341: strojírenství (zaměřený „profesně“)
Zaměření	Stavba výrobních strojů a zařízení Dopravní a manipulační technika	Design průmyslové techniky Diagnostika a servis silničních vozidel Servis zdravotnické techniky

Magisterské studium (2roky, titul Ing.)	
Studijní program	N2301: Strojní inženýrství
Zaměření	Stavba výrobních strojů a zařízení Dopravní a manipulační technika

Více informací naleznete na webech www.kks.zcu.cz a www.fst.zcu.cz

Západočeská univerzita v Plzni, 2013

ISBN 978-80-261-0390-5

© doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.

Předmluva

Předkládaná publikace slouží jako text pro studium předmětů KVS a KOS strojní fakulty. Je zaměřena na konstrukci uložení vřeten obráběcích strojů.

Text je členěn na 2 kapitoly:

- Návrh uložení vřeten a otočných hrotů soustruhu – zahrnuje stanovení zatěžovacích stavů, návrh a kontrolu součástí uložení vřetene včetně teplotní stability ložisek, dále stanovení tuhosti uložení vřetene
- Návrh uložení vřeten frézovacích strojů – zahrnuje stanovení zatěžovacích stavů, návrh a kontrolu součástí uložení vřeten s kuličkovými ložisky s kosoúhlým stykem a kuželíkovými ložisky

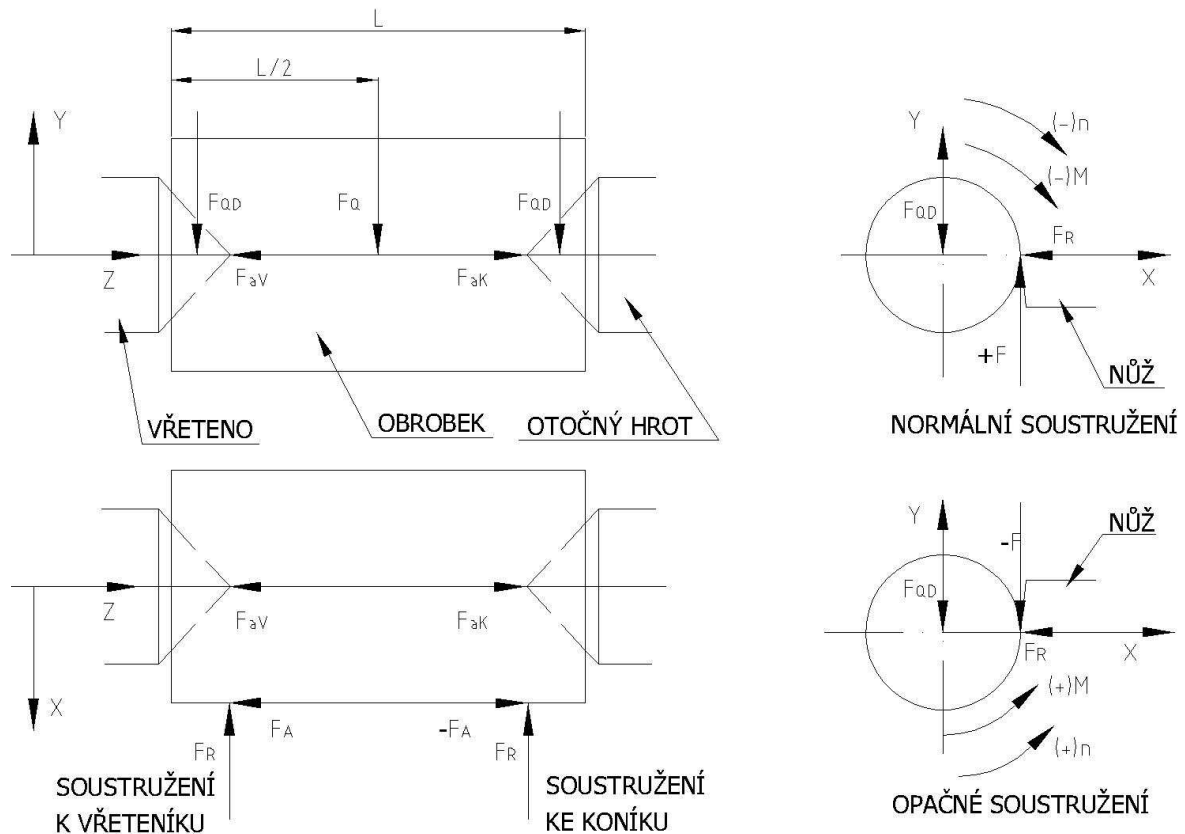
Výpočty se provádějí programy PREV a Mathcad, teplotní stabilita ložisek programem MitCalc.

Obsah

1	Návrh uložení vřeten a otočných hrotů soustruhu.....	1
1.1	Zatěžovací stavy uložení vřetene soustruhu	2
1.1.1	Spektrum zatížení tíhou obrobku	2
1.1.2	Spektrum řezné síly, momentu, otáček	3
1.2	Zatěžovací stavy a obecné zátěžné prvky – údaje pro PREV	5
1.3	Základní rozměry vřetene	7
1.4	Návrh uložení vřetene	8
1.5	Stanovení optimální varianty uložení vřetene soustruhu	9
1.6	Uložení vřetene s válečkovými ložisky radiálními i axiálními.....	11
1.6.1	Kontrola ložisek vzhledem k teplotní stabilitě.....	15
1.6.2	Zpracování náčrtu uložení vřetene - zadání údajů do programu PREV	21
1.6.3	Tuhost uložení vřetene	22
1.6.3.1	Tuhost ve směru X	23
1.6.3.2	Tuhost ve směru Y	26
1.6.4	Kontrola součástí uložení vřetene	27
1.7	Uložení vřetene s radiálním hydrostatickým ložiskem.....	30
2.	Návrh uložení vřeten frézovacích a vyvrtávacích strojů	37
2.1	Zatěžovací stavy a obecné zátěžné prvky	37
2.2	Uložení vřetene na kuličkových ložiskách s kosouhlým stykem.....	42
2.2.1	Kuličková ložiska s úhlem styku 15°	44
2.2.1.1	Zpracování náčrtu uložení vřetene - zadání údajů do PREV	48
2.2.1.2	Kontrola součástí uložení vřetene	50
2.2.1.3	Tuhost uložení vřetene	51
2.2.2	Kuličková ložiska s úhlem styku 25°	51
2.2.2.1	Zpracování náčrtu uložení vřetene - zadání údajů do PREV	52
2.2.2.2	Kontrola součástí uložení vřetene	53
2.3	Uložení vřetene na kuželíkových ložiskách.....	53
2.3.1	Zpracování náčrtu uložení vřetene - zadání údajů do PREV	54
2.3.2	Kontrola součástí uložení vřetene	55
SEZNAMY	59
	Seznam tabulek.....	59
	Seznam příkladů	59
	Seznam obrázků.....	59
	Seznam použité literatury	60
	Firemní literatura (katalogy, www.)	60
	Publikace	60
	Přílohy	60

1 Návrh uložení vřeten a otočných hrotů soustruhu

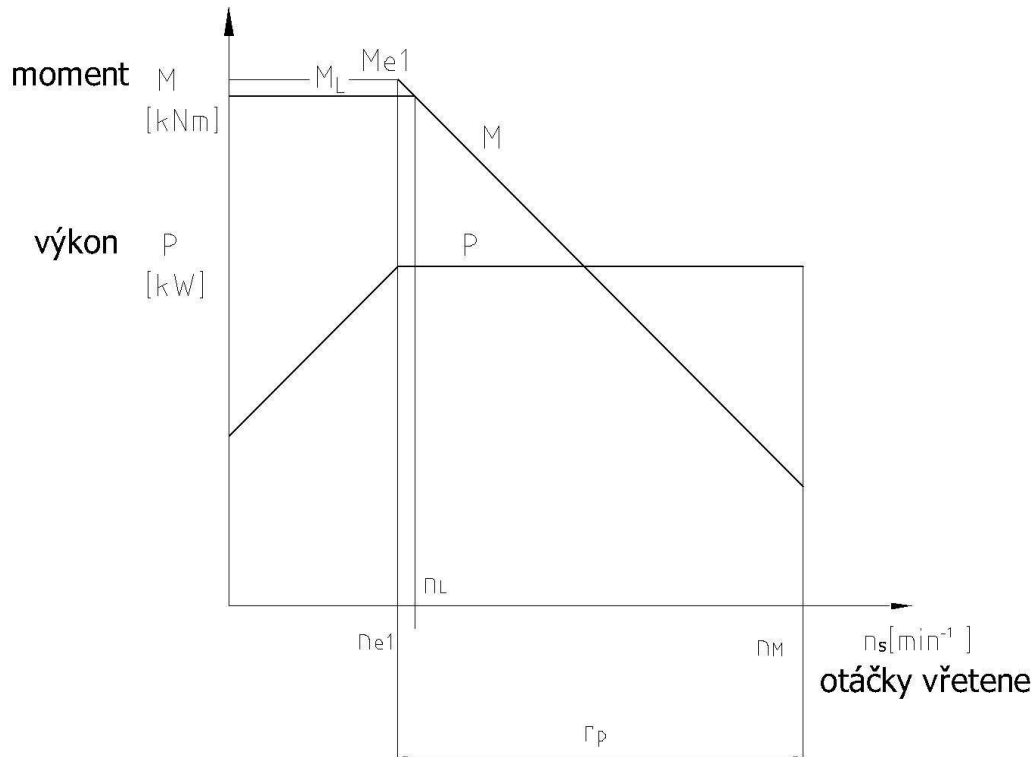
Uložení vřetene se řeší v závislosti na typu stroje, který je charakterizován danými technologickými metodami. Těmto poté odpovídají zatěžující parametry (zatížení, otáčky a doba běhu).



Obr. 1- Zatížení vřetene a koníka soustruhu

Tab. 1 – Základní parametry uložení vřeten soustruhů

Kritéria		Základní parametry	
Převažující technologické operace	Stroje	Hlavní řezný pohyb	
Soustružení vnější i vnitřní (vyvrtávání)	Soustruhy vodorovné Soustruhy svislé	Obrobek	F_M Max. tečná složka řezné síly při soustružení
			F_{QM} Max. tíha obrobku
			M_L Omezný krouticí moment vřetene
			n_L Jmenovité otáčky vřetene při M_L
			n_M Max. otáčky vřetene
			T_1 Doba běhu při obrábění [19]
			T_2 Doba běhu bez obrábění [19]
			T_c Celková doba běhu [19]
			α Vrcholový úhel hrotu



Obr. 2 – Závislost výkonu a momentu na otáčkách vřetene

Zatěžovací stavy jsou rozloženy v regulačním rozsahu konstantního výkonu r_p .

1.1 Zatěžovací stavy uložení vřetene soustruhu

Př.: 1- Zatěžovací stavy vřetene soustruhu

Dáno:

Základní parametry uložení vřetene soustruhu:

Max. tečná složka řezné síly při soustružení	$F_M = 200$ kN
Max. tíha obrobku	$F_{QM} = -250$ kN
Maximální (omezný) krouticí moment vřetene	$M_L = 35$ kNm
Výkon motoru	$P = 100$ kW
Účinnost 1. stupně	$\eta_l = 0,9$
Jmenovité otáčky vřetene při M_L, P, η_l	$n_L = 25$ min ⁻¹
Max. otáčky vřetene	$n_M = 700$ min ⁻¹
Doba běhu při obrábění	$T_1 = 14\ 000$ hod [19]
Doba běhu bez obrábění	$T_2 = 26\ 000$ hod [19]
Celková doba běhu	$T_c = 40\ 000$ hod [19]
Vrcholový úhel hrotu	$\alpha = 90^\circ$

Stanovit:

- Zatěžovací stavy vřetene soustruhu

1.1.1 Spektrum zatížení tíhou obrobku

- Tíhové síly

Pro zatěžovací stavy se zvolí tento vektor tíhy obrobku:

$$F_Q = 0,1 * F_{QM} \quad 0,2 * F_{QM} \quad 0,3 * F_{QM} \quad 0,4 * F_{QM} \quad F_{QM}, i = 1 \dots 5$$

F_Q ... tíha obrobku upnutého mezi hroty nebo v upínací desce a koníku případně v jedné opěře

F_{QD} tíha působící na vřeteno od obrobku

$$F_{QD} = 0,5 * F_Q \dots\dots\dots (1)$$

F_{QM}maximální tíha obrobku

$F_{QD} = -12,5 \quad -25 \quad -37,5 \quad -50 \quad -125 \text{ kN}$
--

1.1.2 Spektrum řezné síly, momentu, otáček

- Řezné síly – hodnoty odpovídají použitému nožovému držáku (horní suport). V tomto případě se použije skříňový suport s deskovými nosiči nástrojů (lamelový suport). Síly se stanoví pro $i = 1 \dots 5$:

- Normální smysl soustružení 1. hrubování :

Tečná síla:

$$F_I = F_M \dots\dots\dots (2)$$

Příčná síla:

$$F_{IR} = 0,6 * |F_I| \dots\dots\dots (3)$$

Podélná síla:

$$F_{IA} = 0,6 * |F_I| \dots\dots\dots (4)$$

$F_I = 200 \text{ kN}$
$F_{IR} = 120 \text{ kN}$
$F_{IA} = 120 \text{ kN}$

- Opačný smysl soustružení (zapichování):

Tečná síla:

$$F_2 = -0,5 * F_M \dots\dots\dots (5)$$

Příčná síla: dle $F_{IR} = 0,6 * |F_I| \dots\dots\dots (2)$

Podélná síla:

$$F_{2A} = 0$$

$F_2 = -100 \text{ kN}$
$F_{2R} = 60 \text{ kN}$
$F_{2A} = 0 \text{ kN}$

- Dokončování:

velikost řezných sil při dokončování se zanedbává tj.:

$$F_3 = F_{3R} = F_{3A} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

- Normální smysl soustružení – 2. hrubování:

Tečná síla:

$$F_4 = 8 \text{ kN} \dots\dots\dots (7)$$

Příčná síla: dle $F_{IR} = 0,6 * |F_I| \dots\dots\dots (2)$

Podélná síla: dle $F_{IA} = 0,6 * |F_I| \dots\dots\dots (3)$

$F_4 = 8 \text{ kN}$
$F_{4R} = 4,8 \text{ kN}$
$F_{4A} = 4,8 \text{ kN}$

➤ Normální smysl soustružení – letmé obrábění

$$F_5 = 0,25 * F_M \dots\dots\dots (8)$$

$F_5 = 50 \text{ kN}$
$F_{5R} = 30 \text{ kN}$
$F_{5A} = 30 \text{ kN}$

Vektor řezných sil je pak dán vztahy:

$F = 200$	-100	0	8	50 kN
$F_R = 120$	60	0	$4,8$	30 kN
$F_A = 120$	60	0	$4,8$	30 kN

• Točivý moment, otáčky

➤ Normální smysl soustružení - 1. hrubování:

$$M_1 = -M_L$$

$$n_1 = -n_L$$

$M_1 = -35 \text{ kNm}$
$n_1 = -24,5 \text{ 1/min}$

➤ Opačný smysl obrábění – zapichování

$$M_2 = 0,5M_L$$

$$n_1 = n_L$$

$M_2 = 17,5 \text{ kNm}$
$n_2 = 24,5 \text{ 1/min}$

➤ Dokončování

$$M_3 = 0$$

$$n_{3,1} = -0,2n_M$$

$$n_{3,2} = -n_M$$

$M_3 = 0$
$n_{3,1} = -140 \text{ 1/min}$
$n_{3,2} = -700 \text{ 1/min}$

➤ 2. Hrubování

$$M_4 = \frac{F_4}{F_M} M_L$$

$$n_4 = \frac{v_{c4}}{v_{c1}} n_L$$

$$\frac{v_{c4}}{v_{c1}} = 5 - 8 \dots\dots \text{poměr řezných rychlostí při 2. a 1. Hrubování}$$

$M_4 = 1,4 \text{ kNm}$
$n_4 = -197 \text{ 1/min}$

➤ Letmé soustružení

$$M_5 = \frac{F_5}{F_M} M_L$$

$$n_5 = \frac{F_M}{F_5} n_L$$

$M_5 = 8,75 \text{ kNm}$
$n_5 = -98 \text{ 1/min}$

Spektrum točivého momentu a otáček je pak dáno vztahem pro $i = 1 \dots 6$:

$M_{10,9}$ vstupní moment vřetene

n_8 otáčky vřetene

$$M_{10,9} = M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad M_3 \quad M_4 \quad M_5$$

$$n_8 = n_1 \quad n_2 \quad n_3 \quad n_3 \quad n_4 \quad n_5$$

$M_{10,9} = -35 \quad 17,5 \quad 0 \quad 0 \quad -1,4 - 8,75 \text{ kNm}$
$n = -25 \quad 25 \quad -140 \quad -700 \quad -196 \quad -98 \text{ min}^{-1}$

1.2 Zatěžovací stavy a obecné zátěžné prvky - údaje pro PREV

V Tab. 2 je uvedeno 9 zatěžovacích stavů, které charakterizují 1. hrubování (1. – 4.), dokončování při maximální tíže obrobku (5.), dokončování při maximálních otáčkách (6.), 2. hrubování (7. – 8.) a letmé soustružení (9.). K těmto skupinám stavů je pak stanovena upínací síla koníka F_{aK} , ze které se poté určí axiální síla působící na vřeteno F_{av} . Výpočet hodnot je proveden v [1].

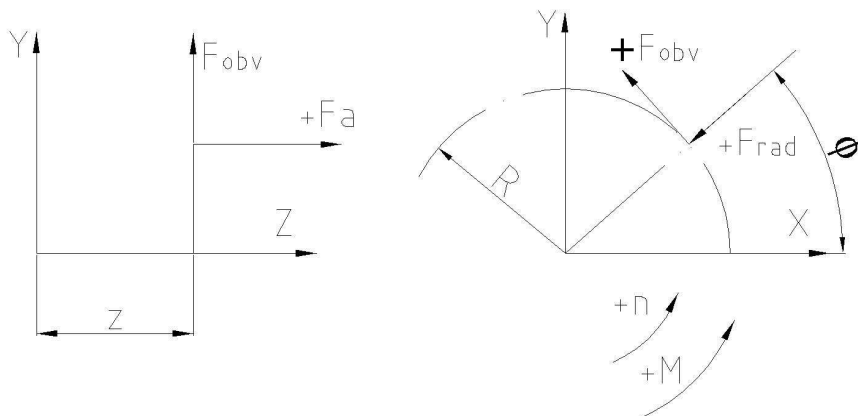
Všechny zatěžovací stavy jsou soustředěny do 1 obecného zátěžného prvku – působíště charakterizovaného cylindrickými souřadnicemi $Z, R = 0, \varphi = 0$. V případě, že je nutné oddělit působíště vektorů sil (např. řezných a tíhových) volí se větší počet obecných zátěžných prvků (viz kap. 2).

Specifikace jednotlivých zatěžovacích stavů určená příslušnými hodnotami obecného zátěžného prvku (F_{obv}, F_{rad}, F_{av}), dále momentu ($M_{10,9}$), otáček (n) a doby běhu (T_i) je zřejmá z Tab. 2.

Zadáním $R = 0, \varphi = 0$ a obvodové složky F_{obv} , radiální F_{rad} , axiální F_{av} se přiřadí údaje z Tab. 2 do položky Obecný zátěžný prvek.

Další parametry zatěžovacích stavů z Tab. 2 (moment $M_{10,9}$, otáčky n a doba běhu T_i) se zaznamenají do položky Zatížení souhmotí.

Kladný smysl momentu a otáček plyne z Obr. 3. Složky vektoru síly se zadávají v soustavě otočené o úhel φ - kladný smysl je dán Obr. 3.



Obr. 3 – Orientace sil, momentu a otáček v souřadné soustavě programu PREV

Zadání parametrů do programu PREV:

Na vstupním výběru „Výpočet souhmotí“ se zvolí:

- Počet mechanických stupňů: 1
- Max. počet zatěžovacích stavů ve stupni: 9

Dále ve výběrech:

Obecné zátěžné prvky

Počet...1	Prvek číslo...1
Typ...Obecné zatížení	

- Souřadnice působišť: Z (dle náčrtu)
- Poloměr působišť: $R = 0$
- Úhel působišť: $\varphi = 0$

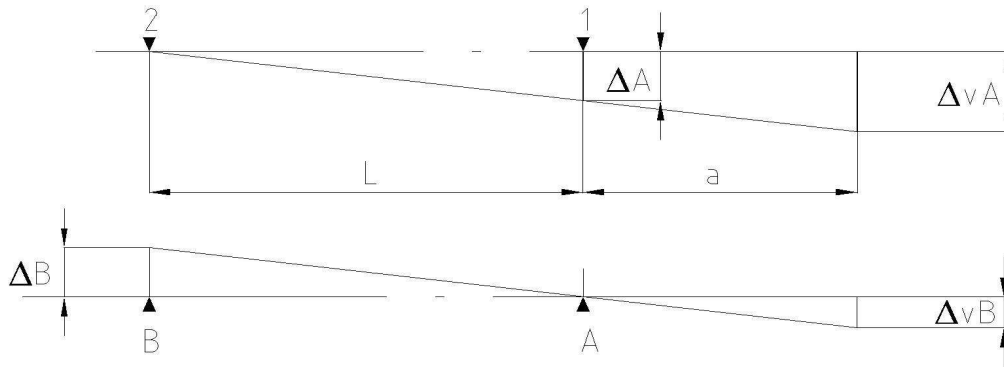
Zátěžný stav číslo... 1

Síly...
 ...obvodová [N]: F_{obv}
 ...radiální [N]: F_{rad}
 ...axiální [N]: F_{av}

Tab. 2 – Zatěžovací stavy vřetene soustruhu [16]

	Síla			Moment		Otacky	Doba behu	
	F_{obv}	F_{rad}	F_{av}	$M_{10.9}$	$M_{26.28}$	n_8	T_i	
Stav	Obvod.	Radialni	Axialni	-	-	-	-	-
	kN	kN	kN	kNm	kNm	min ⁻¹	hod	-
1	150	120	-312	-35	35	-25	2800	0,07
2	-50	0	-312	0	0	-25	5200	0,13
3	-225	60	-233	17,5	-17,5	25	1400	0,035
4	-125	0	-233	0	0	25	2600	0,065
5	-125	0	-125	0	0	-140	10000	0,25
6	-25	0	-50	0	0	-700	4000	0,1
7	29,5	4,8	-42	-1,4	1,4	-196	4200	0,105
8	-37,5	0	-38	0	0	-196	7800	0,195
9	37,5	30	30	-8,75	8,75	-98	2000	0,05
						T_c	40 000	1

1.3 Základní rozměry vřetene



Obr. 4 - Házení konce vřetene

Uložení vřetene soustruhu je charakterizováno poměrem:

$$\lambda = \frac{L}{a} \dots\dots\dots (9)$$

Kde je:

- L vzdálenost mezi ložisky
- a vyložení působíště vnějších sil od předního ložiska

Hodnota (a) je obvykle určena rozměrem upínací desky nebo sklíčidla, který odpovídá požadovanému oběžnému průměru a zatížení. Vzdálenost mezi ložisky (L) je omezena délkou vřeteníku.

Poměr (λ) je u soustruhů určen hodnotou:

- Pro uložení vřetene: 1,5 – 2,2
- Pro uložení otočného hrotu koníka: 1,8 – 2,6

Tato veličina určuje vliv přesnosti ložisek na výslednou přesnost měřenou na konci vřetene. Z obrázku vyplývají vztahy pro házení na konci vřetene:

$$\Delta_v = \Delta_{vA} + \Delta_{vB} \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\Delta_{vA}}{\Delta_A} = \frac{L+a}{L} = 1 + \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots (11)$$

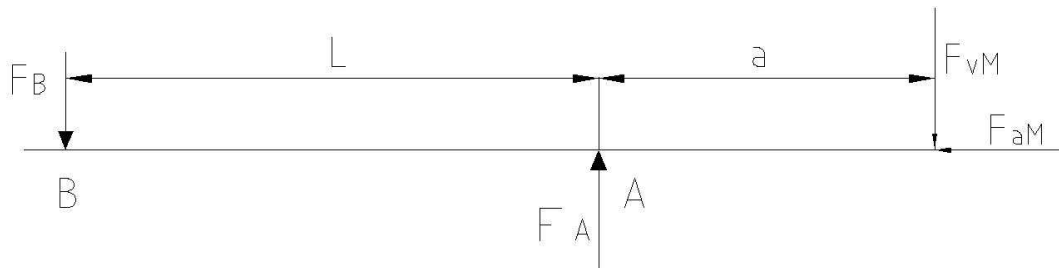
$$\frac{\Delta_{vB}}{\Delta_B} = \frac{a}{L} = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots (12)$$

Kde je:

- Δ_v celkové házení na konci vřetene
- Δ_A, Δ_B házení předního (A) a zadního (B) ložiska
- Δ_{vA}, Δ_{vB} házení předního a zadního ložiska redukované na konec vřetene

Z uvedených vztahů je zřejmé, že s rostoucím λ se vliv házení ložisek Δ_A, Δ_B na hodnotu celkového házení vřetene snižuje a přesnost předního ložiska má na výslednou přesnost větší vliv než přesnost zadního ložiska.

1.4 Návrh uložení vřetene



Obr. 5 - Maximální zatížení ložisek vřetene

Př.: 2 - Maximální zatížení ložisek vřetene soustruhu

Dáno:

Charakteristický poměr uložení vřetene	$\lambda = 1,5$
Maximální hodnota radiální síly na konci vřetene ze zatěžovacích stavů [16]	$F_{vM} = 233 \text{ kN}$
Maximální hodnota axiální síly na konci vřetene zprava ze zatěžovacích stavů [16]	$F_{aVP} = 372 \text{ kN}$
Maximální hodnota axiální síly na konci vřetene zleva ze zatěžovacích stavů [16]	$F_{aVL} = 60 \text{ kN}$
Součinitel statické bezpečnosti (max. hodnota – pouze pro úvodní návrh)	$S_0 = 5$

Stanovit:

- Max. reakce v ložiskách a statické únosnosti ložisek:

Maximální hodnoty sil působících na konci vřetene se stanoví ze vztahů. Pro zvolenou hodnotu (λ) z uvedeného rozsahu se stanoví maximální reakce v ložiskách ze vztahů:

$$F_A = F_{vM} * \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \dots\dots\dots (13)$$

$$F_B = F_{vM} * \frac{1}{\lambda}$$

$$F_{aP} = F_{aMP}$$

$$F_{aL} = F_{aML}$$

$F_A = 388 \text{ kN}$
$F_B = 154 \text{ kN}$
$F_{aP} = 372 \text{ kN}$
$F_{aL} = 60 \text{ kN}$

Předběžná volba typů ložisek a volba rozměrů se provádí pomocí vztahu:

$$S_0 = \frac{C_0}{F_{PA0}} \dots\dots\dots (14)$$

Kde je:

C_0 statická únosnost ložiska

$F_{PA0} = F_{A0}$ předběžná volba ekvivalentního statické zatížení ložiska

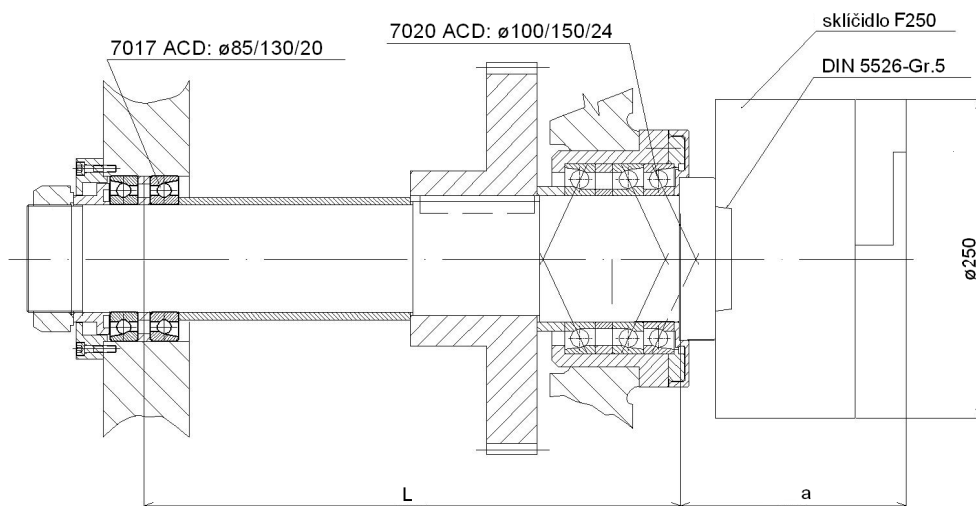
S_0 statická bezpečnost ložiska

Z toho pak vyplývají předběžné hodnoty statické únosnosti ložisek, které umožňují výběr ložisek z katalogu.

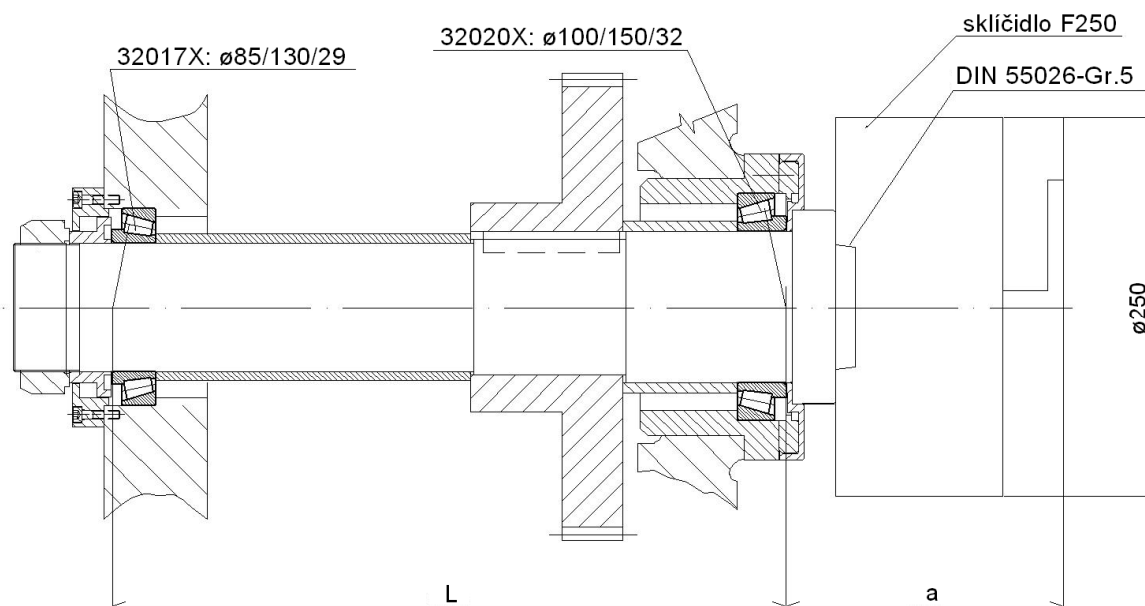
$C_{0A} = 1\,940\text{ kN}$
$C_{0B} = 770\text{ kN}$
$C_{0aP} = 1\,860\text{ kN}$
$C_{0aL} = 300\text{ kN}$

1.5 Stanovení optimální varianty uložení vřetene soustruhu

Pro uložení vřetene soustruhu se nejčastěji používají 3 kombinace ložisek (Obr. 6, Obr. 7, Obr. 9).



Obr. 6 – Uložení vřetene soustruhu – kuličková ložiska s kosouhlým stykem



Obr. 7 – Uložení vřetene soustruhu – kuželíková ložiska

K těmto kombinacím se stanoví ekvivalentní statické zatížení a statická bezpečnost, dále se přiřadí maximální otáčky vřetene (n_M).

Obvykle je zadán průměr předního ložiska vřetene – volí se při projektu stroje na základě parametrů stroje (rozměry, řezné síly atd.) a porovnáním s konkurencí. Tato volba se pak ověřuje při výpočtu uložení vřetene.

Výběr určitého typu uložení se provede pomocí Tab. 3.

Tab. 3 - Kritéria pro volbu varianty uložení vřetene

Typ ložisek		Kritéria			Užití	Varianta Uložení
Radiální	Axiální	Únosnost	Max. otáčky	Přesnost uložení		
Válečková dvouřadá – nejčastěji NNU		Vysoká	Střední	P4	Těžké soustruhy	1: Obr. 9
	Válečková	Vysoká	Střední	P4		
	Kuličková jednosměrná (2x) nebo obousměrná	Střední	Vysoké	P4	Střední soustruhy, frézky	1a
Hydrostatická		Vysoká	Střední	Velmi přesné	Soustruhy, frézky, brusky	2: Obr. 12
Radiální a axiální						
Kuličková s kosoúhlým stykem		Nízká	Velmi vysoké	Velmi přesné	Lehké soustruhy, frézky, brusky	3: Obr.5
Kuželíková		Vysoká	Střední	P5	Soustruhy, frézky	4:

Pro parametry dle Tab. 2 je zřejmě nejvhodnější varianta 1 případně 2. Varianta 1a by nevyhověla vysokému axiálnímu zatížení.

1.6 Uložení vřetene s válečkovými ložisky radiálními i axiálními

Př.: 3 – Přiřazení ložisek vřetene soustruhu

Dáno:

Obr. 9 – Uložení vřetene soustruhu – radiální válečková, axiální válečková ložisk		
	Statická únosnost – požadovaná hodnota	Max. reakce
Přední radiální ložisko	$C_{0A} = 1\,940\text{ kN}$	$F_{AM} = 388\text{ kN}$
Zadní radiální ložisko	$C_{0B} = 770\text{ kN}$	$F_{BM} = 154\text{ kN}$
Axiální ložisko zprava	$C_{0aP} = 1\,860\text{ kN}$	$F_{aP} = 372\text{ kN}$
Axiální ložisko zleva	$C_{0aL} = 300\text{ kN}$	$F_{aL} = 60\text{ kN}$
Statická bezpečnost ložisek – dovolená hodnota pro uložení vřeten	$S_{0D} = 5$	
Max. otáčky vřetene	$n_M = 700\text{ min}^{-1}$	

	Stav	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Axiální síla na hrot vřetene	F_{aV} kN	-372	-252	-252	-252	-125	-25	-96	-60	60

Stanovit:

- Typy ložisek dle katalogu, předpětí a zatížení axiálních ložisek

Radiální ložiska válečková - přední i zadní

Obvykle je zadán i průměr předního ložiska vřetene – volí se již při projektu stroje s ohledem na konkurenční stroje, dále vzhledem k požadované statické únosnosti ložisek a k max. otáčkám vřetene.

Výsledkem je volba radiálních ložisek:

Ložisko přední	SKF: NNU 4968 BK /W33:Ø340/460/118: $C_0 = 2\,650\text{ kN}$, $C = 1\,100\text{ kN}$, $n_B = 1\,400\text{ min}^{-1}$, $n_G = 1\,700\text{ min}^{-1}$
Statická bezpečnost ložiska	$S_0 = 6,8$
Ložisko zadní	SKF: NNU 4940 BK/W33:Ø200/280/180: $C_0 = 1\,040\text{ kN}$, $C = 484\text{ kN}$, $n_B = 3\,000\text{ min}^{-1}$, $n_G = 2\,400\text{ min}^{-1}$
Statická bezpečnost ložiska	$S_0 = 6,75$

Max. otáčky jsou menší než kinematicky přípustné otáčky ložisek tj.:

$$n_M \leq \min(n_{Gi}), i = 1,2$$

Radiální vůli válečkových ložisek s kuželovou dírou lze nastavit na hodnotu:

$$\Delta_r = 0,005 - 0,01\text{ mm} \dots \text{dle velikosti ložiska}$$

Axiální ložiska válečková

Volba ložiska z katalogu:

Lož. axiální zprava	SKF: 81244:Ø220/300/63: $C_0 = 3\,450\text{ kN}$, $C = 940\text{ kN}$, $n_B = 310\text{ min}^{-1}$, $n_G = 1\,100\text{ min}^{-1}$
Statická bezpečnost ložiska	$S_0 = 9,2$
Lož. axiální zleva	SKF: 81144:Ø220/270/37: $C_0 = 1\,730\text{ kN}$, $C = 420\text{ kN}$, $n_B = 420\text{ min}^{-1}$, $n_G = 1\,200\text{ min}^{-1}$
Statická bezpečnost ložiska	$S_0 = 28,8$

Max. otáčky jsou menší než kinematicky přípustné otáčky ložisek tj.:

$$n_M \leq \min(n_{G_i}), i = 1, 2$$

Předpětí axiálních ložisek

Axiální válečková ložiska musí být předepnuta tak, aby nedocházelo k odlehčení pod hodnotu $F_{a\min}$ a tím ke smýkání válečků a k následnému poškození ložiska. Minimální předpětí musí být zajištěno při uvedených zatěžovacích stavech F_{av} .

Minimální předpětí ložiska - dle [3]:

$$F_{a\min} = 0,0005 * C_0 + k_a * \left(\frac{C_0 * n_M}{10^8} \right)^2 \dots\dots\dots (15)$$

$F_{a\min}$ se stanoví pro větší ložisko tj. :

pro $C_0 = 3450$ kN

$k_a = 0,9$ ložisko typu 812

$F_{a\min} = 2,3$ kN

Předpětí axiálních ložisek se stanoví ze vztahů pro předepjatý spoj za předpokladu shodné tuhosti obou ložisek:

Předpětí pro max. hodnotu ze zatěžovacích stavů 1-8 (zprava) tj.:

$$\text{MAX} (|F_{av1-8} |) = 372 \text{ kN}$$

$$F_{0P} = \frac{\text{MAX} (|F_{av1-8} |)}{2} + F_{a\min} \dots\dots\dots (16)$$

Předpětí pro zatěžovací stav 9 (zleva):

$$F_{av9} = 60 \text{ kN}$$

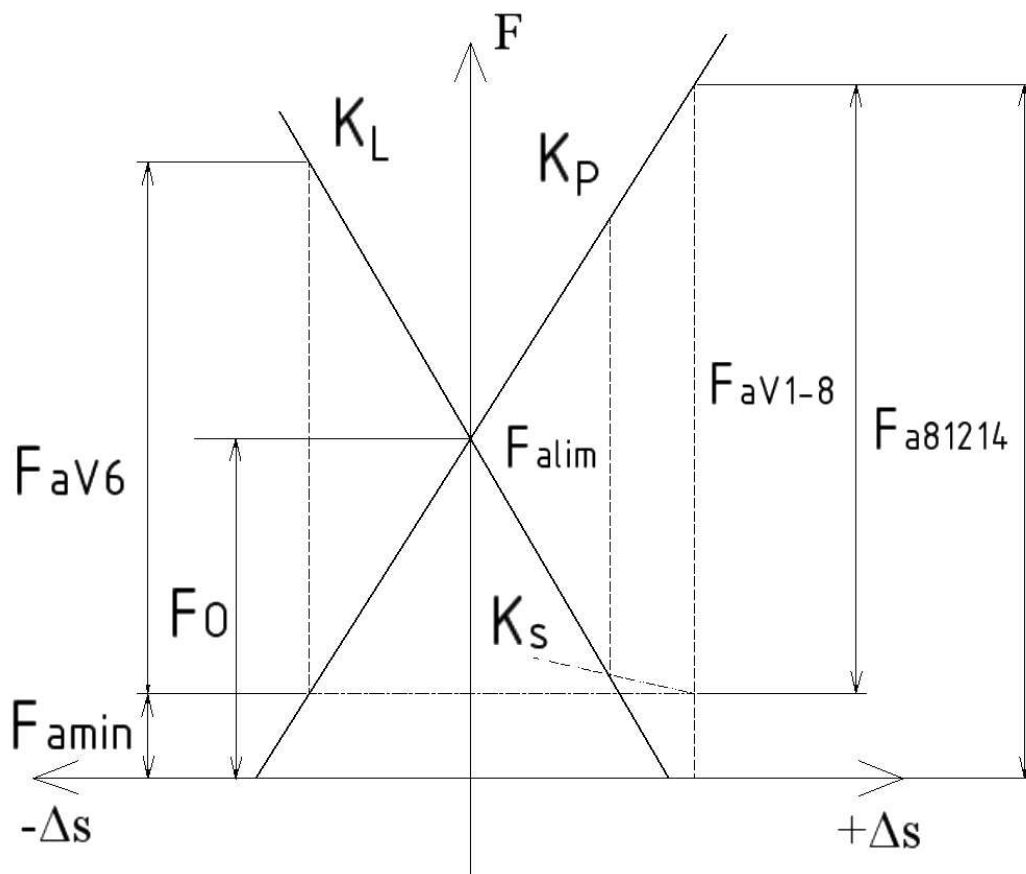
$$F_{0L} = \frac{F_{av9}}{2} + F_{a\min}$$

$F_{0P} = 188$ kN
$F_{0L} = 32,3$ kN

Předpětí F_{0P} je zřejmě příliš vysoké – způsobilo by vysoké trvalé zatížení ložisek a tím snížení jejich životnosti. Proto se volí předpětí F_{0L} a opěrné těleso levého axiálního ložiska se vybaví pružinami předepnutými na $F_{a\min}$ (Obr. 8 – tuhost pružin k_s).

Předpětí se zadá do programu PREV společně s axiálními ložisky:

$F_0 = 32,5$ kN



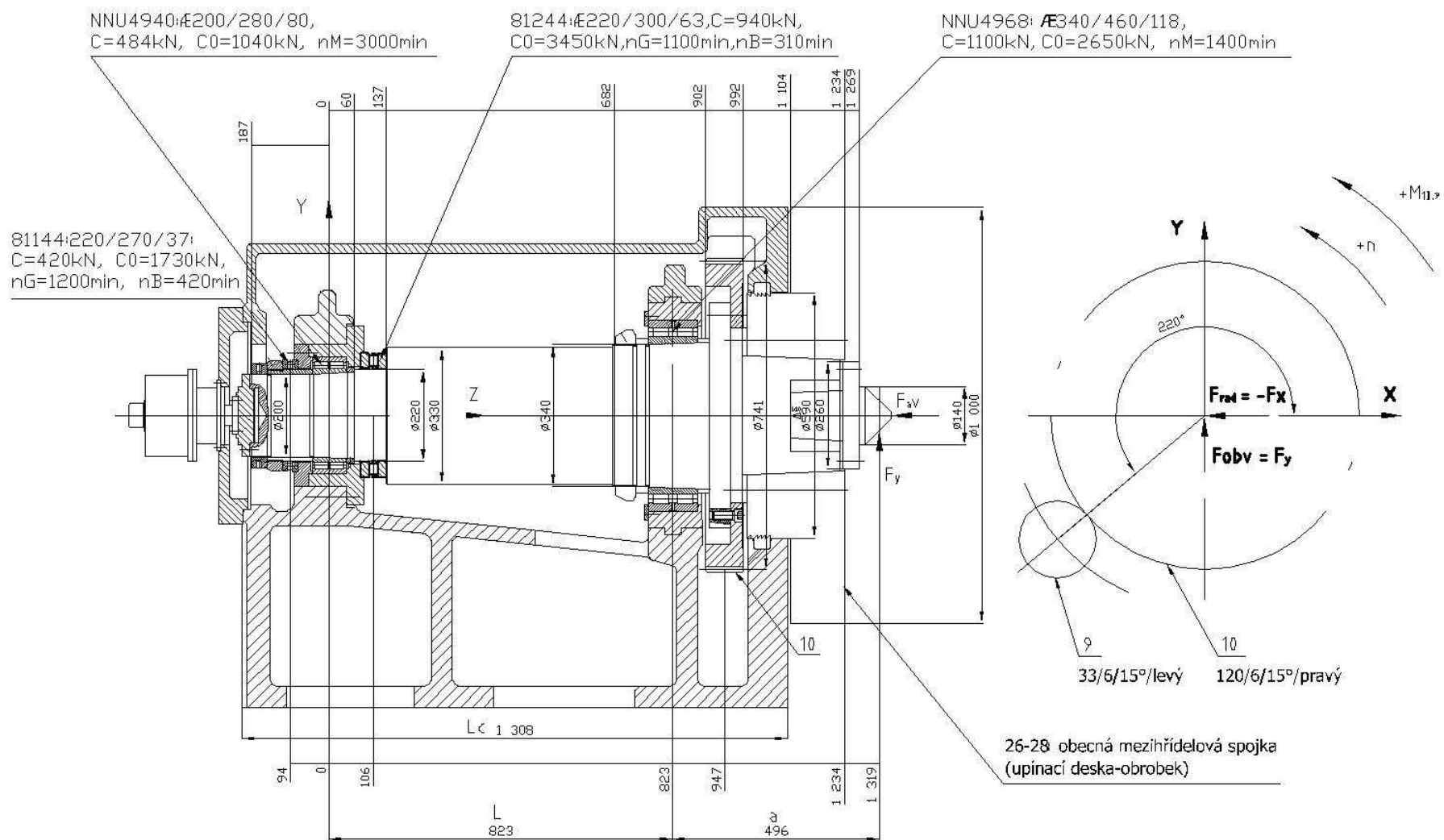
Obr. 8 – Předpětí axiálních ložisek

Zatížení jednotlivých ložisek

Zatížení jednotlivých ložisek (ložisko zleva 81144, ložisko zprava 81244) se stanoví z výsledků programu PREV – vreteno1.vys [11], který zahrnuje všechny axiální síly působící na vřeteno (včetně sil z finálního převodu).

PREV: vreteno1.vys

Stav			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zatížení ložiska	F_{a81144}	kN	-	-	-	-	-	-21,5	-	-9,6	-61,3
	F_{a81244}	kN	397,2	252	226,8	252	125	-46,5	103,5	-69,6	-13,8



Obr. 9 – Uložení vřetene soustruhu – radiální válečková, axiální válečková ložiska

1.6.1 Kontrola ložisek vzhledem k teplotní stabilitě

Teplotní stabilita je stav, kdy při konstantních provozních podmínkách teplota ložiska neroste. Tomuto stavu odpovídají tepelně bezpečné provozní otáčky n_{zul} .

V katalogích některých firem (FAG, INA) jsou pro ložiska (s výjimkou čtyřbodových kuličkových, axiálních kuličkových a soudečkových ložisek) uvedeny maximální hodnoty otáček ve veličinách „Tepelně referenční otáčky n_B a kinematicky přípustné otáčky n_G “.

Tepelně referenční otáčky n_B :

(Thermal reference speed, Bezugdrehzahl) jsou vztaženy k referenčním podmínkám – [3]:

- střední teplota ložiska: $\vartheta_L = 70^\circ C$
- teplota okolí: $\vartheta_A = 20^\circ C$
- zatížení: $P = 0,05 * C_0$
- provozní kin. viskozita maziva:

Tab. 4 - Provozní kin. viskozita maziva [mm²/s]

Ložisko	Mazání		
	Olejová lázeň	Olej - cirkulace	Tuk
Radiální	12	-	22
Axiální	-	48	-

- Měrný tepelný tok v uložení ložiska:

A_L [mm²].....plocha uložení ložiska v tělese a na hřídeli
axiální ložisko

$$A_L = \frac{\pi}{2} * (D^2 - d^2) \dots\dots\dots (17)$$

- Radiální ložisko

$$A_L = \pi B * (D + d) \dots\dots\dots (18)$$

Plocha uložení ložiska v tělese a na hřídeli	$A_L < 25\,000$ [mm ²]
--	------------------------------------

$$Q_{s1} = 20 * 10^{-6} [kW / mm^2] * A_L \dots\dots\dots (19)$$

Plocha uložení ložiska v tělese a na hřídeli	$A_L > 25\,000$ [mm ²]
--	------------------------------------

$$Q_{s2} = 20 * 10^{-6} [kW / mm^2] * \left(\frac{A_L}{25000} \right)^{-0,34} * A_L \dots\dots\dots (20)$$

- Měrný tepelný tok mazivem:

- Axiálního válečkového ložiska

$$Q_{L1} = 20 * 10^{-6} [kW / mm^2] * A_L \dots\dots\dots (21)$$

- Axiálního jehlového ložiska

$$Q_{L2} = 10 * 10^{-6} [kW / mm^2] * A_L \dots\dots\dots (22)$$

Kinematicky přípustné (mezní) otáčky n_G :

(Kinematically permissible speed, Grenzdrehzahl) – tyto otáčky nesmí být při provozu překročeny.

Tepelně přípustné otáčky n_{zul}

(Thermally safe operating speed, thermal permissible speed) se určují pro vybrané zatěžovací stavy – je to dovolená hodnota otáček uvedených zatěžovacích stavů - platí tedy:

$$n \leq n_{zul} \leq n_G \dots\dots\dots (23)$$

kde (n) jsou otáčky vybraných zatěžovacích stavů.

Výpočet tepelně přípustných provozních otáček je založen na tepelné bilanci ložiska.

Tepelně přípustné otáčky se stanoví ze vztahu:

$$n_{zul} = n_B * f_n \dots\dots\dots (24)$$

Součinitel tepelně přípustných provozních otáček (f_n) se určí ze vztahu uvedeném v [3].

Př.: 4 – Tepelně bezpečné provozní otáčky axiálního válečkového ložiska

Dáno:

Axiální ložisko 81244: 220/300/63	Obr. 9 – Uložení vřetene soustruhu – radiální válečková, axiální válečková ložiska.
Tepelně referenční otáčky	$n_B = 310 \text{ min}^{-1}$
Kinematicky přípustné otáčky	$n_G = 1\,100 \text{ min}^{-1}$
Střední provozní teplota ložiska	$\vartheta_m = 50^\circ \text{C}$
Teplota okolí	$\vartheta_A = 20^\circ \text{C}$

Zatěžovací stavy:					
Stav	Vnější síla	Předpětí	Zatížení ax. ložiska 81244	Otáčky	Doba běhu
	$F_{av}[\text{N}]$	$F_0 [\text{N}]$	$F_{a81244} [\text{N}]$	$n [\text{min}^{-1}]$	T[hod]
5	125 000	32 500	128 000	140	4 000
6	25 000		45 000	700	14 000
7	96 000		99 000	350	4 900

Mazání oběhové	
Kin. viskozita maziva při 40°C (jmenovitá)	$\nu_{40} = 32 \text{ mm}^2/\text{s}$

Stanovit:

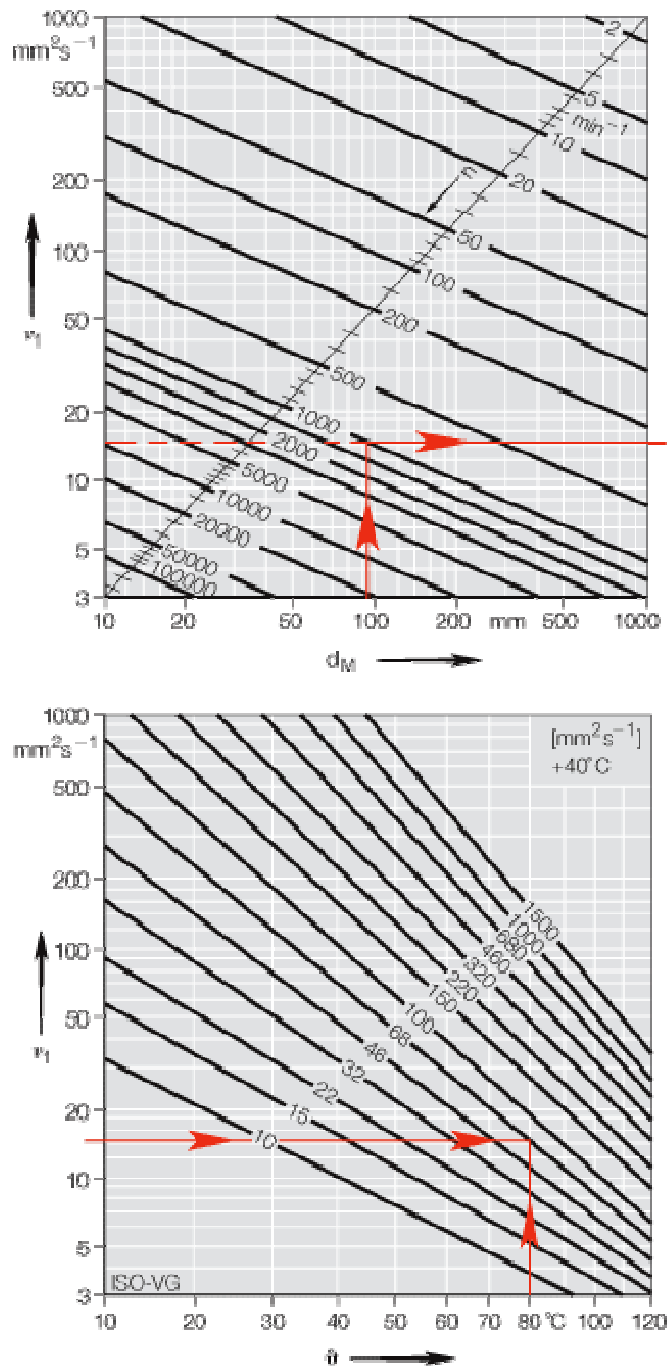
- Tepelně bezpečné provozní otáčky n_{zul}

Z daných rozměrů ložiska se stanoví střední průměr:

$$d_M = \frac{D + d}{2}$$

$d_M = 260 \text{ mm}$

Vyhledání: [ina.de](#) → [Schaeffler KG](#) → [Products](#) → [MediasR:Product Catalogue](#) → [MediasRHome](#) → [Basic principles](#) → [Oil lubrication](#):



Obr. 10 – Referenční viskozita v_l oleje a provozní teplota ložiska [3]

Z grafu se stanoví pro dané veličiny d_M , v_{40} a řadu otáček referenční viskozita v_l a provozní teplota ložiska v :

Otáčky	Referenční viskozita	Provozní teplota oleje v ložisku
n [min^{-1}]	v_l [mm^2/s]	v [$^{\circ}\text{C}$]
140	50	30
700	14	66

Vyhledání: *ina.de* → *Schaeffler KG* → *Products* → *MediasR:Product Catalogue* → *MediasRHome* → *Basic principles* → *Friction and increases in temperature*:

Využití těchto veličin a vztahů:

- pasivní momenty ložiska:
 (moment závislý na otáčkách a viskozitě oleje)

pro $(v_1 * n) \geq 2000$:

$$M_0 = f_0 * (v_1 * n)^{2/3} * d_M^3 * 10^{-10} \text{ [Nm]} \dots\dots\dots (25)$$

pro $(v_1 * n) \leq 2000$:

$$M_0 = f_0 * d_M^3 * 160 * 10^{-10} \text{ [Nm]} \dots\dots\dots (26)$$

Kde je :

f_0 ložiskový součinitel

Axiální ložisko 812: mazání oběhové	$f_0 = 3$
-------------------------------------	-----------

Pro zatěžovací stavy se stanoví součinitel $(n * v_1)$ a třecí moment M_0 :

Stav	$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	$n * v_1$		$M_0 \text{ [Nm]}$
5	140	7 000	>2 000	1,9
6	700	9 800	>2 000	2,4

- Moment závislý na valivém odporu:

$$M_1 = f_1 * F_{al} * d_M \text{ [Nm]} \dots\dots\dots (27)$$

Kde je:

f_1 součinitel valivého odporu

$f_1 = 0,0015$

Axiální ložisko 812:		
	Celkové zatížení ax. ložiska 81244	Moment val. odporu
Stav	$F_{a81244} \text{ [N]}$	$M_I \text{ [Nm]}$
5	128 000	50
6	45 000	17,5

- Celkový pasivní moment a tepelný výkon:

Pro zatěžovací stavy se stanoví třecí moment M_I , celkový moment M_R a tepelný výkon odváděný z ložiska:

$$M_R = M_0 + M_1 \dots\dots\dots (28)$$

$$P_R = M_R * \omega \dots\dots\dots (29)$$

Stav	Otáčky	Třecí moment	Moment val. odporu	Čelkový moment	Tepelný výkon ložiska
	$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	$M_0 \text{ [Nm]}$	$M_I \text{ [Nm]}$	$M_R \text{ [Nm]}$	$P_R \text{ [W]}$
5	140	1,9	50	52	0,76
6	700	2,4	17,5	20	1,46

Vyhledání: [ina.de](#)→[Schaeffler KG](#)→[Products](#)→[MediasR:Product Catalogue](#)→[MediasRHome](#)→[Basic principles](#)→[Speeds](#):

Tepelný výkon odváděný plochami pro uložení ložiska v tělese a na vřetenu:

➤ Plocha uložení axiálního ložiska v tělese a na hřídeli dle vztahu:

$$A_L = \frac{\pi}{2} * (D^2 - d^2)$$

$$A_L = 65\,312 \text{ mm}^2$$

➤ Součinitel přestupu tepla ploch pro uložení ložiska k_q :

Pro $10 \leq A_L \leq 25000$ [mm²]:

$$k_q = 0,4$$

Pro $A_L > 25000$ [mm²]:

$$k_q = 0,4 * \left(\frac{25000}{A_L} \right)^{0,34} \text{ [kW/m}^2 \cdot \text{K]} \dots\dots\dots (30)$$

$$k_q = 0,29 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$$

➤ Přestup tepla plochou uložení ložiska:

$$Q_s = k_q * A_L * \Delta v_A \dots\dots\dots (31)$$

Kde je:

$$\Delta v_A = v_m - v_A$$

v_m ... střední provozní teplota ložiska

v_A ... teplota okolí

Stav	Tepelný výkon ložiska	Střední provozní teplota ložiska	Teplotní spád ložiska k okolí	Přestup tepla plochou uložení ložiska
	P_R [kW]	v_m [°C]	Δv_A [K]	Q_s [kW]
5	0,74	50	30	0,56
6	1,5			
7	1,5			

➤ Tepelný výkon Q_L odváděný olejem [3]:

$$Q_L = 0,0286 * \Delta v_L * V_L \text{ [kW]} \dots\dots\dots (32)$$

Kde je:

Δv_L ... teplotní spád proudu mazacího oleje [K] – doporučené hodnoty [3]:

➤ Radiální ložiska: 15 – 30 K

➤ Axiální ložiska: 5 – 15 K

$$\Delta v_L = v_{Lout} - v_{Lin}$$

v_{Lout} teplota chladícího oleje vytékajícího z ložiska:

$$v_{Lout} = v_m$$

$$v_{Lout} = 50^\circ\text{C}$$

v_{Lin} teplota chladícího oleje vtékajícího do ložiska - závisí na výkonu chladícího systému stroje, minimální hodnota pro systémy stabilizace teploty stroje k teplotě okolí:

$$v_{Lin} = v_A - 3K$$

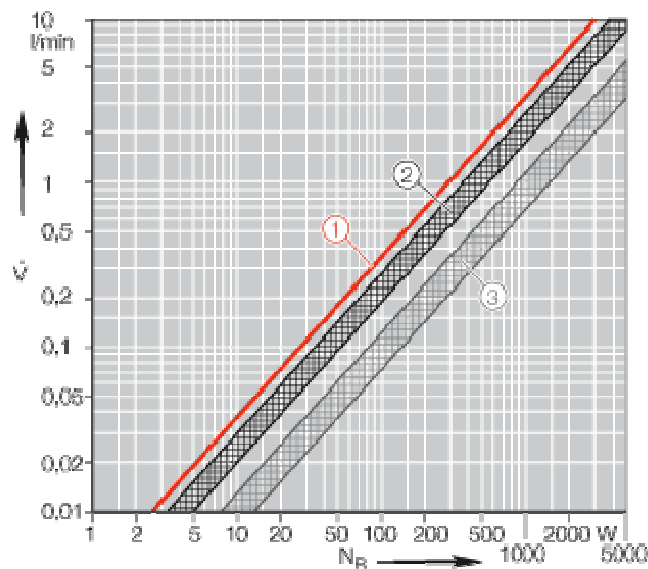
Volba	$v_{Lin} = 35^\circ\text{C}$
-------	------------------------------

$$\Delta\vartheta_L = 15^\circ\text{C}$$

V_Lproud oleje [l/min]:

Z grafu na **Obr. 11** lze stanovit požadovaný proud chladicího oleje v závislosti na třecím výkonu ložiska při tepelném spádu $\Delta\vartheta_L = 10\text{K}$ pro tyto případy:

- (1)....graf neuvažuje s přenosem tepla vedením, zářením a prouděním
- (2)....graf uvažuje s normálním přenosem tepla vedením, zářením a prouděním
- (3)....graf uvažuje s velmi dobrým přenosem tepla vedením, zářením a prouděním



Obr. 11 – Proud oleje v závislosti na třecím výkonu ložiska [3]

Pro axiální ložisko dle **Obr. 9** lze stanovit proud oleje pomocí grafu (3) pro třecí výkon $P_R = 1,7 \text{ kW}$:

$$V_L = 4 \text{ l/min}$$

Tab. 5 – Tepelný výkon ložiska a přestup tepla

Stav	Tepelný výkon ložiska	Provozní teplota ložiska	Teplovní spád ložiska k okolí	Tepelný výkon přestupem tepla do tělesa	Teplovní spád proudu mazacího oleje	Tepelný výkon odváděný olejem
	$P_R[\text{kW}]$	$v_m [^\circ\text{C}]$	$\Delta v_A [\text{K}]$	$Q_s [\text{kW}]$	$\Delta\vartheta_L [\text{K}]$	$Q_L[\text{kW}]$
5	0,74	50	30	0,56	15	1,7
6	1,5	50	30	0,56	15	1,7

Celkový tepelný výkon odváděný z ložiska je pak dán vztahem:

$$Q_c = Q_s + Q_L$$

Ve variantě A – bez odvodu tepla chladicím olejem:

$$Q_{cA} = 0,56 \text{ kW}$$

Ve variantě B – s odvodem tepla chladicím olejem:

$$Q_{cB} = 2,28 \text{ kW}$$

Součinitele vlivu maziva (k_L) a vlivu zatížení (k_p):

$$k_{Li} = \frac{M_{0i} * \omega_B}{Q_c} * 10^{-3} \dots\dots\dots (33)$$

$$k_{pi} = \frac{M_{li} * \omega_B}{Q_c} * 10^{-3} \dots\dots\dots (34)$$

$$\text{pro } \omega_B = \frac{2 * \pi * n_B}{60}$$

Pomocí těchto součinitelů se pak stanoví součinitel tepelně bezpečných provozních otáček (f_n):

$$f_{ni} = \frac{490,77}{1 + 498,78 * k_{Li}^{0,599} + 852,88 * k_{pi}^{0,963} - 504,5 * k_{Li}^{0,055} * k_{pi}^{0,832}} \dots\dots\dots (35)$$

Bez chlazení olejem:

Stav	k_{Li}	k_{pi}	f_{ni}
5	0,111	2,865	0,348
6	0,139	1,007	0,881
7	0,145	2,216	0,441

S chlazením olejem

Stav	k_{Li}	k_{pi}	f_{ni}
5	0,027	0,71	1,36
6	0,034	0,25	3,081
7	0,036	0,549	1,676

Využitím vztahu $n_{zul} = n_B * f_n \dots (36)$ se stanoví tepelně přípustné otáčky k jednotlivým stavům. Užitím programu [18] se dosáhne srovnatelných hodnot.

Tab. 6 – Tepelně přípustné otáčky

Stav	Zatížení axiálního ložiska 81244	Otáčky	Doba běhu	Tepelně přípustné otáčky				
				Bez chlazení olejem		S chlazením olejem 4l/min		
				F_{a81244}	n	T	n_{zul}	n_{zul}
				[kN]	[min ⁻¹]	[hod]	[min ⁻¹]	[min ⁻¹]
				Dle [3]	Dle[18]	Dle [3]	Dle[18]	
5	128	140	10 000	108	115	421	340	
6	45	700	2600	273		955		

Z porovnání uvedených variant vyplývá, že požadovaných otáček lze dosáhnout pouze při užití chladicího systému.

1.6.2 Zpracování náčrtu uložení vřetene - zadání údajů do programu PREV

Z uvedených údajů (λ , typ uložení, ložiska, finální převod) a z rozměru prostoru určeného projektem stroje pro vřeteník, lze zpracovat náčrt uložení vřetene (Obr. 9). Rozměry vřetene, ložiska, převodové prvky a obecné zátěžné prvky z tohoto náčrtu s příslušnými zatěžovacími stavy se zadají do PREV.

Převodové prvky vřetene:

➤ Finální převod hlavního pohonu

Finální převod, kterým je obvykle věnec s pastorkem s čelním ozubením, je u těžkých soustruhů uložen na vřetenu před předním ložiskem (Obr. 9) – důvodem je dosažení vysoké torzní tuhosti hlavního pohonu. Střední a lehké soustruhy mají věnec obvykle mezi předním a zadním radiálním ložiskem. Průměr věnce je dán rozměrem vřeteníku. Převodový poměr se určí při návrhu převodovky hlavního pohonu.

Věnec – převodový prvek 10:	$z_{10} = 120$
	$m = 6 \text{ mm}$
	$\beta = 15^\circ$
	pravý
Pastorek - převodový prvek 9	$z_9 = 33$
➤ souřadnice polohy zabírajícího pastorku 9	Obr. 9
➤ osová vzdálenost	$a = 477 \text{ mm}$

➤ Spojení upínací desky vřetene s obrobkem

zajišťuje přenos zátěžného momentu od obrobku na vřeteno – v terminologii PREV je to obecná mezihřídelová spojka označená 26 - 28.

Soubor PREV [11]	vreteno1.dhl
Výstupní soubor PREV	vreteno1.vys

1.6.3 Tuhost uložení vřetene

Tuhost uložení vřetene se zjišťuje ve směrech X a Y. Tuhost ve směru X určuje dynamickou poddajnost soustruhu a tím jeho vlastnosti při hrubování i dokončování. Tuhost ve směru Y je vyjádřena tuhostí v posunutí a sklonem vřetene ve vztahu k síle působící na konci vřetene. Posunutí a úhel sklonu na konci vřetene ovlivňuje kvalitu upnutí obrobku v čelistech desky (uvolňování upnutí) a přesnost kruhového pohybu obrobku (geometrická přesnost a kvalita obráběného povrchu).

Tuhost uložení vřetene se vztahuje do místa působící síly a zahrnuje:

- tuhost vlastního vřetene
- tuhost ložisek
- tuhost těles, ve kterých je vřeteno uloženo

1.6.3.1 Tuhost ve směru X

Př.: 5 – Tuhost vlastního vřetene a ložisek v místě hrotu ve směru X.

Dáno:

vřeteno l.vys: [11]		Reakce v ložiskách ve směru X	
		Zatěžovací stav	
Ložisko		1 - normální soustružení	3 - opačné soustružení
		N	N
2	NNU4940	-86 060	-14 252
4	NNU4968	239 317	-13 218
Posunutí u_x		mm	-0,966E-01
Zatížení vřetene F_R		kN	-120

Vzdálenost mezi ložisky	$L = 823$ mm
Vzdálenost hrotu od předního ložiska	$a = 496$ mm

Stanovit:

- Jednotlivé složky tuhosti v místě hrotu vřetene a celkovou tuhost

Tuhost vlastního vřetene

Tuhost se stanoví v místě působící síly ve směru X tj. F_R z posunutí u_x stanovených v [11] pro zatěžovací stavy 1 a 3.

Tuhost je pak dána vztahem:

$$k_{vx} = \frac{F_R}{u_x} \dots\dots\dots (37)$$

Poddajnost:

$$p_{vx} = \frac{1}{k_{vx}} \dots\dots\dots (38)$$

		Zátěžný stav	
		1 - normální soustružení	3 - opačné soustružení
Tuhost vlastního vřetene k_{vx}	kN/mm	1242	3429

Rozdíl hodnot tuhosti je ovlivněn orientací síly na pastorku

Tuhost ložisek

Deformace ložiska se dvěma řadami válečků je dána vztahem [9]:

$$\delta = 7,68 * 10^{-5} * \frac{|F_R|^{0,9}}{\left(i * \frac{z_v}{5}\right)^{0,9} * L_v^{0,8}} \text{ [mm]} \dots\dots\dots (39)$$

Poddajnost ložiska při zatížení silou F_R se stanoví derivací předchozího vztahu:

$$p_L(F_R) = \frac{d\delta}{dR} = 7,68 * 10^{-5} * \frac{|F_R|^{0,1}}{\left(i * \frac{z_v}{5}\right)^{0,9} * L_v^{0,8}} = \frac{\delta(F_R)}{F_R} * 0,9 \text{ [mm/kN]} \dots\dots\dots (40)$$

Z tohoto vztahu vyplývá tuhost ložiska při zatížení R :

$$k_L(F_R) = \frac{1}{p_L(F_R)} = \frac{F_R}{0,9 * \delta(F_R)} \text{ [kN/mm]} \dots\dots\dots (41)$$

Kde je:

- F_R [N] reakce v ložisku
- L_v [mm] délka válečku
- z_v počet válečků v řadě
- i počet řad válečků

Uvedené hodnoty se stanoví takto:

Z katalogových rozměrů ložiska E a F se stanoví průměr válečku:

$$D_v = \frac{E - F}{2} \dots\dots\dots (42)$$

Kde je:

- E [mm] vnější průměr vnitřního kroužku
- F [mm] vnitřní průměr vnějšího kroužku
- Pro D_v se z katalogu ložisek stanoví délka válečku L_v .

Počet válečků se pak stanoví ze vztahu:

$$z_v = \pi * \frac{F + D_v}{D_v + 3mm}$$

Z těchto vztahů se stanoví rozměry a počet válečků, dále posunutí hřídele v místech jednotlivých ložisek při přiřazení:

$F_R = F_{R_x}$, $\Delta_x = \delta * (-1) * \text{sgn}(F_{R_x})$, tj. posunutí má opačné znaménko než příslušná reakce.

Tab. 7 – Vnitřní rozměry ložisek

Poř.	Typ ložiska	Vnitřní průměry ložiska		Počet řad vál.	Průměr vál.	Délka vál.	Počet vál.
		E	F				
		mm	mm				
2	NNU4940	225	257	2	16	32	45
4	NNU4968	379	423	2	22	37	55

Obr. 9 – Uložení vřetene soustruhu – radiální válečková, axiální válečková ložiska

Deformace ložisek Δ_x se transformuje na hrot vřetene pomocí vztahů:

➤ Přední ložisko 4:

$$\delta_{4x} = \Delta_{4x} * \left(1 + \frac{a}{L}\right) \dots\dots\dots (43)$$

Zadní ložisko 2:

$$\delta_{2x} = -\Delta_{2x} * \frac{a}{L} \dots\dots\dots (44)$$

Posunutí na hrotu způsobené deformací ložisek je pak dáno součtem:

$$\delta_{Lx} = \delta_{2x} + \delta_{4x} \dots\dots\dots (45)$$

Tuhost na hrotu určená ložisky je dána vztahem:

$$k_{Lx} = \frac{F_R}{\delta_{Lx}} \dots\dots\dots (46)$$

Z výsledků je zřejmé, tuhost určená ložisky závisí na způsobu zatěžování, ze kterého vyplývá hnací síla pastorku finálního převodu.

Pořadí	Typ ložiska	Zátěžný stav			
		1		3	
		Deformace Δ_x	Tuhost $k_L(F_R)$	Deformace Δ_x	Tuhost $k_L(F_R)$
		mm	kN/mm		
2	NNU4940	0,018	9 720	0,002	8 122
4	NNU4968	-0,034	14 490	0,001	10 850
Posunutí na hrotu vlivem deformace ložisek δ_{Lx}		-0.035		0,001	

Celková tuhost ve směru X

Celková deformace na konci vřetene je dána součtem poddajnosti vlastního vřetene s poddajností ložisek redukovanými na hrot vřetene tj.:

$$\frac{1}{k_{xc}} = \frac{1}{k_{vx}} + \frac{1}{k_{Lxc}} \dots\dots\dots (47)$$

	Stav 1-normální soustružení		Stav 3-opačné soustružení	
	kN/mm	Podíl podd.	kN/mm	Podíl podd.
Tuhost vlastního vřetene k_{vx}	1 242	0,73	3 429	0,94
Tuhost na hrotu vlivem deformace ložisek k_{Lx}	3 395	0,27	6 0290	0,06
Celková tuhost ve směru X: k_{xc}	909	1	3 635	1

Z výsledků je zřejmé, že tuhost je rozdílná ve stavu 1 a 3. Je to určeno silou na pastorku pohonu. Umístění pastorku má tedy na celkovou tuhost významný vliv.

Z porovnání celkové tuhosti s tuhostí vlastního vřetene vyplývá, že tuhost ložisek výrazně ovlivňuje celkovou tuhost pouze při stavu 1.

1.6.3.2 Tuhost ve směru Y

Př.: 6 – Tuhost vlastního vřetene a ložisek v místě hrotu ve směru Y

Dáno:

vřeteno l.vys: [11]		Reakce v ložiskách ve směru Y
		Zatěžovací stav
Ložisko		5 - dokončování
		N
2	NNU4940	-75334.2
4	NNU4968	200334.2
Posunutí u_y	mm	-0.851E-01
Zatížení vřetene F_y	kN	-125

Vzdálenost mezi ložisky	$L = 823 \text{ mm}$
Vzdálenost hrotu od předního ložiska	$a = 496 \text{ mm}$

Stanovit:

- Jednotlivé složky tuhosti v místě hrotu vřetene a celkovou tuhost

Tuhost vlastního vřetene

Tuhost se stanoví v místě působící síly ve směru Y tj. F_y z posunutí u_y stanovených v [11] pro zatěžovací stav 5:

Tuhost je pak dána vztahem:

$$k_{vy} = \frac{F_y}{u_y} \dots \dots \dots (48)$$

Poddajnost:

$$p_{vy} = \frac{1}{k_{vy}} \dots \dots \dots (49)$$

		Zátěžný stav
		5 - dokončování
Tuhost vlastního vřetene k_{vy}	kN/mm	1469

Tuhost ložisek

Při využití vztahů uvedených v předchozím článku (Tuhost ve směru X) se stanoví:

		Deformace ložiska
		Δ_y
		Zátěžný stav
Pořadí	Typ ložiska	5
2	NNU4940	0,009
4	NNU4968	-0,016

Posunutí na hrotu vlivem deformace ložisek δ_{Ly}

Celková tuhost ve směru Y

Celková deformace na konci vřetene je dána součtem poddajnosti vlastního vřetene s poddajností ložisek redukovanými na hrot vřetene tj.:

$$\frac{1}{k_{yc}} = \frac{1}{k_{vy}} + \frac{1}{k_{Ly}} \dots\dots\dots (50)$$

	Stav 5-dokončování	
	kN/mm	Podíl podd.
Tuhost vlastního vřetene k_{vy}	1 469	0,74
Tuhost na hrotu vlivem deformace ložisek k_{Ly}	4 122	0,26
Celková tuhost ve směru X: k_{yc}	1 083	1

Celková tuhost není ovlivněna silou pastorku hlavního pohonu.

Deformace skříně vřeteníku

Skříň vřeteníku, ve které je uloženo vřeteno se deformuje působením sil stanovených z reakcí ložisek pro stavy 1, 3 a 5 v levotočivé soustavě souřadnic. Reakce pro uvedené stavy jsou uvedeny v *vřeteno1.vys*: [11] - Reakce ložisek. Zatížení skříně je dáno reakcí axiálního ložiska vřetene a reakcí v ložisku pastorku finálního převodu. Při podrobnějším rozboru se uvažuje i s reakcemi ostatních ložisek Deformace se určuje obvykle ve směru X.

Reakce ložisek

<i>vřeteno1.vys</i> : [11]								
Stav	Síly působící na hrotu vřetene			Složky reakce ložiska NNU4940		Složky reakce ložiska NNU4968		Reakce ax. ložiska 81244
	N			N		N		N
	F_R	F_y	F_{ac}	F_{Rx}	F_{Ry}	F_{Rx}	F_{Ry}	F_{a81244}
1	120000	162500	-187500	239317	-362060	-86060	104875	397162
3	60000	-225000	-225000	-13218	409882	-14252	-135688	226837
5	0	-125000	-225000	0	200334	0	-75334	125000

Celková tuhost vřeteníku

Celková tuhost vřeteníku sestává z tuhosti vřetene, ložisek a skříně vřeteníku a zjišťuje se obvykle pro tyto případy:

- ve směru X od síly působící ve směru X (dynamická stabilita a pracovní přesnost stroje)
- ve směru X od síly působící ve směru Z (pracovní přesnost stroje)

1.6.4 Kontrola součástí uložení vřetene

Výpočet prováděný pomocí programu PREV zahrnuje:

- Kontrolu ložisek: součinitel dynamické bezpečnosti (trvanlivosti), součinitel statické bezpečnosti, bezpečnost proti přetáčkování (vztažená k mezním otáčkám ložiska)
- Kontrolu max. namáhání vřetene
- Kontrolu deformací v místě záběru finálního převodu (sklonu a posunutí) a sklonu v místech ložisek
- Pevnostní kontrolu finálního převodu

Př.: 7 – Kontrola součástí uložení vřetene dle výstupního souboru programu

Dáno:

Výstupní soubor PREV	vřeteno I.vys: [11]
----------------------	----------------------

Stanovit:

- Charakteristické veličiny pro součásti uložení vřetene a porovnat je s dovolenými hodnotami

Kontrola ložisek

Doba běhu $T_c = 40000$ hod	Údaje z [11]		Dovol. hodnota	Pozn.
Ložisko axiální zleva – typ 81144				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	666233		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$	-	16,6	1	vyhovuje
Součinitel statické bezpečnosti ložiska	-	27,12	5	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti přetáčkovaní	-	1,71		viz kap.1.6.1: Kontrola ložisek vzhledem k teplotní stabilitě
Sklon vřetene v ložisku	rad	0,16e-3	0,9e-3	Vyhovuje – dov. hodnota dle Tab. 8
Ložisko radiální zadní NNU4940				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	158933		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$	-	4	1	vyhovuje
Součinitel statické bezpečnosti ložiska	-	7.62	5	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti přetáčkovaní	-	4,29		viz kap.1.6.1: Kontrola ložisek vzhledem k teplotní stabilitě
Sklon vřetene v ložisku	rad	0,16e-3	0,9e-3	Vyhovuje – dov. hodnota dle Tab. 8
Ložisko axiální zprava 81244				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	58762		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$	-	1,46	1	vyhovuje
Součinitel statické bezpečnosti ložiska	-	8,69	5	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti	-	1,57		viz kap.1.6.1: Kontrola

preotáčkování				ložisek vzhledem k teplotní stabilitě
Sklon vřetene v ložisku	rad	0,12e-3	0,9e-3	Vyhovuje – dov. hodnota dle Tab. 8

Ložisko radiální přední NNU4968				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	74748		vyhovuje
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$	-	1,86	1	vyhovuje
Součinitel statické bezpečnosti ložiska	-	6.35	5	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti preotáčkování	-	2		viz kap.: Kontrola ložisek vzhledem k teplotní stabilitě
Sklon vřetene v ložisku	rad	0,23e-3	0,9e-3	Vyhovuje – dov. hodnota dle Tab. 8

Maximální napětí v souhmotí

Stav	Souřadnice z[mm]	Údaje z [11]: Napětí [MPa]	Dovolená hodnota [7]: mat.: 15241 (hrot) ohyb – střídavé zatížení [MPa]	Pozn.
3	1 269.0	67.6	160	vyhovuje

Deformace ve finálním převodu

		Údaje z [11]	Dovolená hodnota	Pozn.
Průhyb	mm	0.349E-01	0,04	vyhovuje
Sklon	rad	0.300E-03	0,001	vyhovuje

Kontrola finálního převodu

Součinitel bezpečnosti [11]	Kolo 10	Kolo 9	Dovolená hodnota	Pozn.
Ohyb	1,73	2,02	1,7	vyhovuje
Dotyk	1,48	1,68	1,2	vyhovuje

Tab. 8 - Přípustné hodnoty sklonu hřídele v ložisku [2]

Ložisko	Sklon			Max. zatížení
	´	•	rad	
Válečkové N., NN, kuželíková	4	0,07	0,001	P/C < 0,2
Kuličková ložiska:				
• 62, 622, 63, 623, 64	16	0,27	0,005	
• 618, 160, 60	10	0,17	0,003	
• dvouřadá	-	4	0,070	

Soudečková:				
• jednořadá	-	4	0,070	
• dvouřadá	-	0,5	0,009	

1.7 Uložení vřetene s radiálním hydrostatickým ložiskem

Radiální hydrostatická ložiska se užívají hlavně pro dosažení vysoké přesnosti kruhového pohybu vřetene. Lze dosáhnout radiálního házení pod 0,005 mm i pro průměry vřeten kolem 600 mm.

Hydrostatická ložiska jsou podstatně širší než valivá stejné únosnosti. Při zachování poměru $\lambda = \frac{L}{a} = 1,5$ následně dochází k zvětšování vzdálenosti mezi ložisky a tím k prodlužování skříně vřeteníku.

Další nevýhodou je vyšší třecí výkon ložiska než u valivého provedení.

Následující výpočet se provádí dle [8].

Hydrostatické ložisko dle je charakterizováno těmito rozměry a vztahy:

Průměr ložiska D – obvykle se volí odhadem.

Šířka ložiska B je určena vztahem:

$$\delta_L = \frac{B}{D} \dots\dots\dots (51)$$

Šířka komory b_1 :

$$\lambda_L = \frac{b_1}{B} \dots\dots\dots (52)$$

Délka komory l_1 :

$$l_1 = \frac{\pi * D}{4} * \lambda_L \dots\dots\dots (53)$$

Hodnoty λ_L, δ_L určují bezrozměrné součinitele ložiska dle tabulky:

Tab. 9 – Bezrozměrné součinitele hydrostatického radiálního ložiska

λ_L	δ_L	k_F	k_C	k_Q	k_T	k_R
$\frac{1}{3}$	0,5	0,233	0,155	5,05	0,0523	0,00174
	0,6	0,246	0,158	4,47	0,0598	0,00150
	0,8	0,263	0,153	3,65	0,0709	0,00119
	1	0,273	0,140	3,04	0,781	0,00101
$\frac{1}{2}$	0,5	0,313	0,198	8,48	0,0458	0,00207
	0,6	0,322	0,193	7,28	0,0516	0,00176
	0,8	0,334	0,176	5,66	0,0602	0,00139
	1	0,341	0,153	4,61	0,0648	0,00303

Př.: 8 – Charakteristické parametry hydrostatického ložiska

Dáno:

Obr. 12 – Uložení vřetene soustruhu – přední radiální hydrostatické ložisko
Obr. 13 – Hydrostatické ložisko
Průměr ložiska $D = 340\text{mm}$

Součinitel šířky ložiska	$\delta_L = 1$	
Součinitel šířky komory	$\lambda_L = 0,5$	
Tlak v komorách nezátíženého ložiska	$p_0 = 6 \text{ MPa}$	
Kinematická viskozita oleje při 40°C	$\nu = 4,6 * 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,9 * 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
Max. otáčky čepu	$n_M = 700 \text{ min}^{-1}$	
vreteno I. vys [11]	Zatěžovací stav 3	Zatěžovací stav 5
➤ Max. zatížení čepu:	$F_R = 410 \text{ kN}$	$F_R = 200 \text{ kN}$
➤ Sklon čepu v ložisku	$\varphi_L = 0,23e-3 \text{ rad}$	-
➤ Otáčky čepu	-	$n_5 = 140 \text{ min}^{-1}$

Stanovit:

- Charakteristické parametry ložiska

Pro dané veličiny λ_L , δ_L se z Tab. 9 stanoví vybrané bezrozměrné součinitele ložiska:

$\lambda_L = \frac{b_1}{B}$	$\delta_L = \frac{B}{D}$	Součinitel únosnosti ložiska	Součinitel tuhosti ložiska	Součinitel průtoku maziva ložiskem	Součinitel tlumení ložiska	Součinitel pro výpočet Re
λ_L	δ_L	k_F	k_C	k_Q	k_T	k_R
0,5	1	0,341	0,153	4,61	0,0648	0,00303

Ze uvedených vztahů se stanoví:

$B = 340 \text{ mm}$
$b_1 = 170 \text{ mm}$
$l_1 = 134 \text{ mm}$

Dále se stanoví průmět ložiska:

$$S = D * B \dots\dots\dots (54)$$

$S = 0,116 \text{ m}^2$

Dále lze z předchozích vztahů stanovit šířky můstků ložiska l_2 a b_2 :

$$l_2 = \frac{\pi * D}{8} * (1 - \lambda_L) \dots\dots\dots (55)$$

$$b_2 = \frac{D * \delta_L}{2} * (1 - \lambda_L) \dots\dots\dots (56)$$

$l_2 = 0,67 \text{ m}$
$b_2 = 0,85 \text{ m}$

Poloměrová vůle ložiska h_0 je dána vztahem:

$$h_0 = 22 * 10^{-5} * D \dots\dots\dots (57)$$

$h_0 = 0,075 \text{ mm}$

Celkové množství oleje protékající ložiskem:

$$Q_c = 4 * G_0 * k_Q * p_0 \dots\dots\dots (58)$$

$Q_c = 5,6 \text{ litr} \cdot \text{min}^{-1}$
--

kde G_0 je hydraulická vodivost 1 komory, η dynamická viskozita:

$$\eta = \nu * \rho$$

$$G_0 = \frac{h_0^3}{12 * \eta}$$

$G_0 = 8,4 \cdot 10^{-13} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}$
--

Maximální tlak v komoře je dán vztahem:

$$p_M = p_0 + \frac{F_M}{4 * S * k_F} \dots\dots\dots (59)$$

$p_M = 8,6 \text{ MPa}$

Tlak čerpadla:

$$p_c = 1,1 * p_M \dots\dots\dots (60)$$

$p_c = 10 \text{ MPa}$

Při regulaci kapilárami (konstantní hydraulický odpor):

$$\frac{p_c}{p_0} \geq 1,5 \dots\dots\dots (61)$$

vyhovuje	$\frac{p_c}{p_0} = 1,6$
----------	-------------------------

Při regulaci ventilem (konstantní průtok):

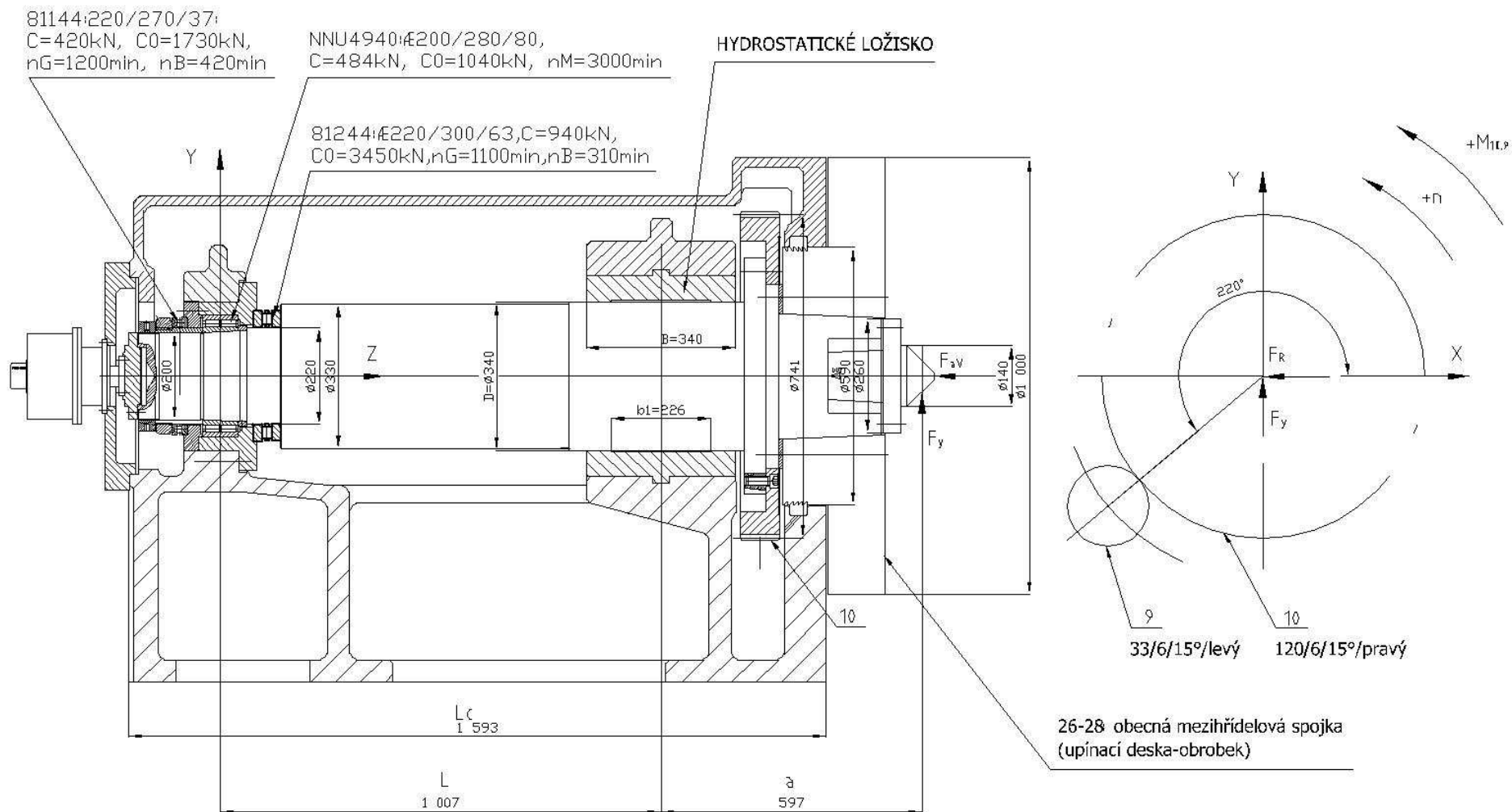
$$p_c - p_M > 0,6 - 1,4 \text{ MPa} \dots\dots\dots (62)$$

vyhovuje	$p_c - p_M = 1,4 \text{ MPa}$
----------	-------------------------------

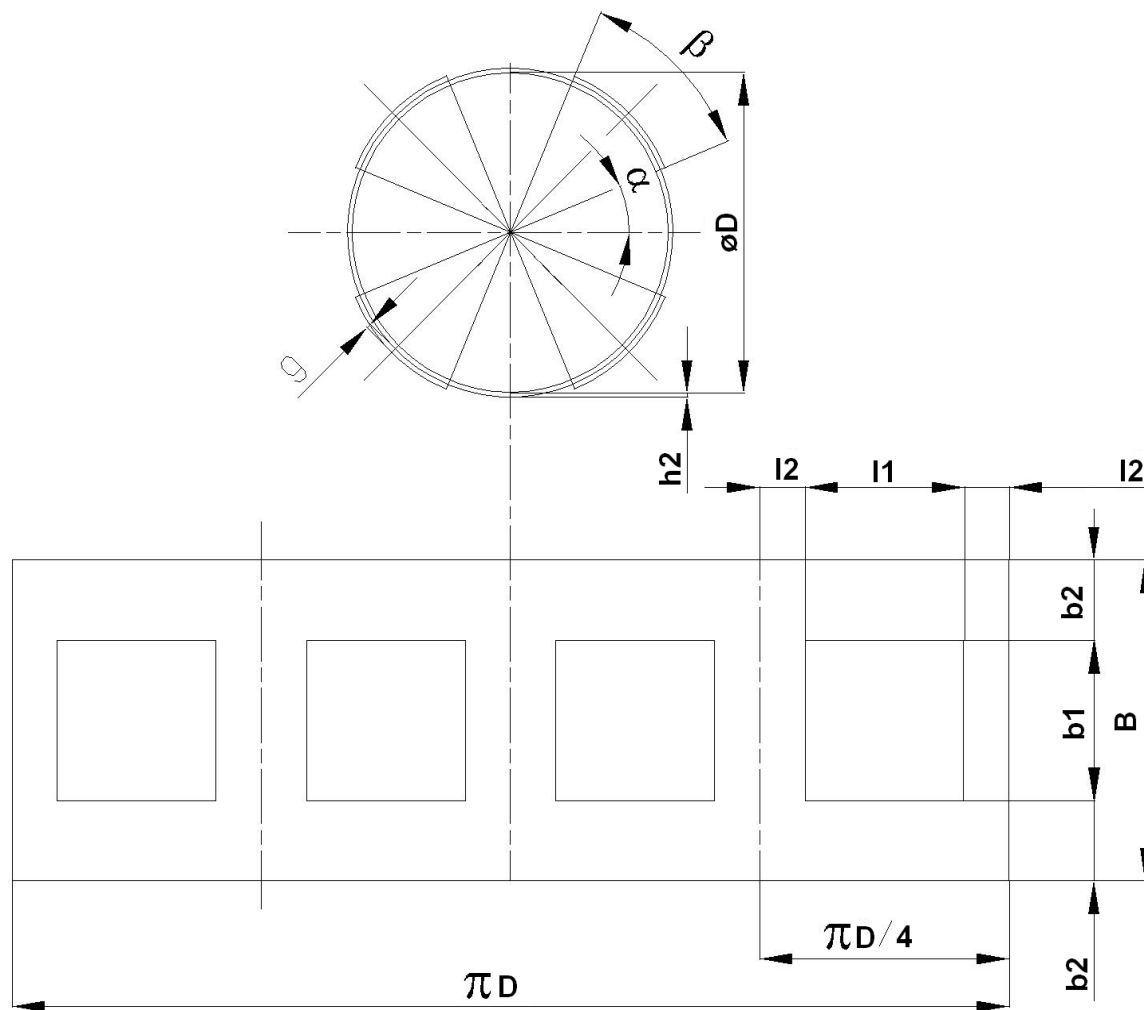
Hydraulický příkon čerpadla:

$$P_c = Q_c * p_c \dots\dots\dots (63)$$

$P_c = 0,9 \text{ kW}$



Obr. 12 – Uložení vřetene soustruhu – přední radiální hydrostatické ložisko



Obr. 13 – Hydrostatické ložisko

Tuhost ložiska:

$$k_L = \frac{12 * S * k_C * p_0}{h_0} \dots \dots \dots (64)$$

$k_L = 1,7e4 \text{ kN.mm}^{-1}$

Tuhost je zřejmě srovnatelná s tuhostí válečkového ložiska, která byla stanovena v Př.: 5 – Tuhost vlastního vřetene a ložisek v místě hrotu ve směru X.	$k_L(F_R) = 14490 \text{ kN.mm}^{-1}$ pro $F_R = 239317 \text{ N}$
--	---

Výsledná vůle mezi čepem a ložiskovou pánví:

- Posunutí čepu vlivem zatížení:
- Absolutní posunutí

$$\Delta_M = \frac{F_R}{k_L} \dots \dots \dots (65)$$

$\Delta_M = 0,024 \text{ mm}$

- Relativní posunutí

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta_M}{h_0} \dots\dots\dots (66)$$

$\varepsilon_M = 0,322$
Dovolená hodnota: 0,4

➤ Posunutí vlivem sklonu čepu v ložisku:

➤ Absolutní posunutí

$$\Delta_L = \varphi_L * \frac{B}{2}$$

$\Delta_L = 0,04\text{mm}$

➤ Relativní

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta_L}{h_0}$$

$\varepsilon_L = 0,55$

➤ Výsledná vůle mezi čepem a ložiskem:

➤ Absolutní

$$\Delta_{vule} = h_0 - \Delta_M - \Delta_L$$

$\Delta_{vule} = 0,011 \text{ mm}$

➤ Relativní

$$\varepsilon_{vule} = \frac{\Delta_{vule}}{h_0}$$

$\varepsilon_{vule} = 0,06$
Min. dovolená hodnota: 0,3

Při max. zatížení ložiska dochází k zmenšení vůle mezi ložiskem a čepem pod přípustnou hodnotu – to je způsobeno velkým sklonem čepu v ložisku. Tento stav lze zlepšit zvětšením počátečního tlaku, průměru čepu případně volbou užšího ložiska.

Třecí výkon ložiska:

➤ Plocha pro výpočet ohřevu oleje:

$$S_T = \pi * S * (1 - \lambda_L^2) \dots\dots\dots (67)$$

$S_T = 0,272\text{m}^2$

Třecí výkon ložiska pro:

$$\omega_M = 2 * \pi * n_M$$

$$P_T = \eta * S_T * \frac{(0,5 * D * \omega_M)^2}{h_0} \dots\dots\dots (68)$$

$P_T = 23,4 \text{ kW}$

Vysoký třecí výkon nelze odvést přirozeným vedením tepla – musí se použít chladnička oleje.

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \rho * \frac{h_0}{\eta} * \left(\frac{p_0 * h_0}{6 * \eta} * k_R + 0,5 * D * \omega \right) \dots\dots\dots (69)$$

$Re = 29,2$
 Laminární proudění pro $Re < 2300$

Posunutí čepu vlivem jeho otáček a zatížení:

Souřadnice polohy čepu při jeho zatížení svislou silou R_{AyM} a při otáčkách n_M :

➤ Součinitel tlumení ložiska:

$$\kappa_L = \frac{S^2 * k_T}{G_0} \dots\dots\dots (70)$$

$\kappa_L = 1000 \text{ kN.s.mm}^{-1}$

➤ Odchytky polohy ve směru X a Y pro zatěžovací stav 5 (dokončování):

$$\Delta x = \frac{\kappa_L * \pi * n_5}{k_L^2 + (\kappa_L * \pi * n_5)^2} * F_y \dots\dots\dots (71)$$

$$\Delta y = \frac{\kappa_L}{k_L^2 + (\kappa_L * \pi * n_5)^2} * F_y$$

$\Delta x = 0,004 \text{ mm}$
 $\Delta y = 0,0006 \text{ mm}$
 Hodnoty jsou přípustné
 vzhledem k tolerančnímu
 poli IT6 obráběných
 průměrů

2. Návrh uložení vřeten frézovacích a vyvrtávacích strojů

2.1 Zatěžovací stavy a obecné zátěžné prvky

Tab. 10 - Základní parametry uložení vřeten frézovacích a vyvrtávacích strojů

Kriteria			Základní parametry zatěžujících stavů	
Převažující technologické operace	Stroje	Hlavní řezný pohyb		
Frézování Vrtání Vyvrtávání	Frézovací stroje Frézovací a vyvrtávací stroje Frézovací zařízení Vyvrtávací zařízení	Nástroj	P	Výkon hlavního řezného pohybu
			M_L	Omezný krouticí moment vřetene
			n_L	Jmenovité otáčky vřetene při M_L
			n_M	Max. otáčky vřetene
			T_I	Doba běhu při obrábění [19]
			$T_c = T_I$	Celková doba běhu [19]
			Obr. 2 – Závislost výkonu a momentu na otáčkách vřetene	

Př.: 9 – Zatěžovací stavy frézovacího vřetene

Dáno:

Výkon	$P = 40 \text{ kW}$
Omezný krouticí moment	$M_L = 1\,900 \text{ Nm}$
Maximální otáčky vřetene	$n_M = 3\,000 \text{ min}^{-1}$
Celková doba běhu	$T_c = 14\,000 \text{ hod}$
Obráběný materiál:	
➤ Pevnost (tvrdost)	600 MPa (175 HB)
➤ Označení dle [6]	CMC : 02.1
1. stav: Využití max. momentu i výkonu při obtížných podmínkách obrábění – pravá čelní fréza (1. obecný prvek), kontrola stavu pomocí programu [6] :	
➤ Řezná rychlost	$v_I = 100 \text{ m/min}$
➤ Řezný materiál	S6
➤ Rozsah posuvu na zub	$f_{zI} = 0,1 - 0,4 \text{ mm/z}$
2. stav: Opačné otáčky vzhledem k 1. stavu – levá čelní fréza	
3. stav: Využití max. výkonu při dobrých podmínkách obrábění – pravá čelní fréza stejného průměru jako při 1. stavu – stanovení parametrů v, P, n, F pomocí programu [6]:	
➤ Řezný materiál	SM30
➤ Rozsah posuvu na zub	$f_z = 0,1 - 0,4 \text{ mm/z}$
4. stav: Využití instalovaného výkonu válcovou čelní frézou (2. obecný prvek):	
➤ Průměr frézy (odhad)	$D_2 = 50 \text{ mm}$
➤ Řezný materiál	1025
➤ Rozsah posuvu na zub	$f_{z4} = 0,05 - 0,12$

	mm/z
5. stav: Využití instalovaných maximálních otáček vřetene n_M válcovou čelní frézou (3. obecný prvek):	
➤ Řezná rychlost	$v_5 = 200 \text{ m/min}$
➤ Řezný materiál	1 025
➤ Rozsah posuvu na zub	$f_{z5} = 0,05 - 0,12 \text{ mm/z}$
6. stav: Obrábění zadního čela kotoučovou frézou (ověření axiálního uložení v opačném smyslu - 4. obecný prvek):	
➤ Průměr frézy (odhad)	$D_4 = 200 \text{ mm}$
➤ Řezná rychlost	$v_6 = 200 \text{ m/min}$
➤ Řezný materiál	1025
➤ Rozsah posuvu na zub	$f_{z6} = 0,05 - 0,12 \text{ mm/z}$

Stanovit:

- Zatěžovací stavy vřetene

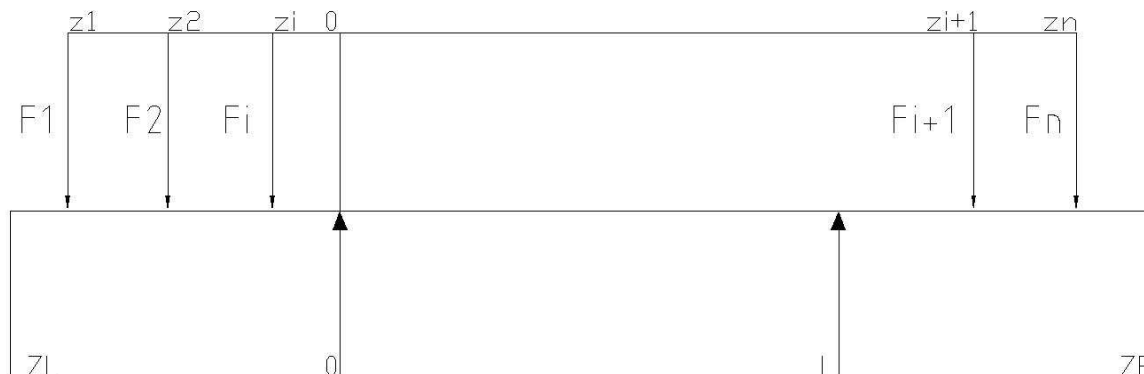
Z daného výkonu P a omezného momentu M_L se stanoví n_L ze vztahu:

$$n_L = \frac{P}{2 * \pi * M_L} \dots\dots\dots (72)$$

$n_L = 201 \text{ min}^{-1}$

Pro využití závislosti výkonu a momentu na otáčkách se stanoví charakteristické nástroje (čelní fréza, válcová fréza, kotoučová fréza případně vrták), které představují v terminologii PREV obecné prvky. Zadání obecných prvků má tato pravidla (Obr. 14):

- pořadí zleva doprava
- rostoucí hodnota souřadnice z_i obecného prvku i – obecný prvek v terminologii PREV je charakterizován poloměrem a souřadnicemi polohy sil:
 - $z_{i+1} \geq z_i$, pro $i = 1 \dots n$, $n = 5 \dots \text{max. počet obecných prvků}$
 - souřadnice obecného prvku musí být v definičním oboru souřadnic nosného profilu:
 - $z_i \in \langle Z_L, Z_P \rangle$



Obr. 14 – Obecné prvky – umístění na nosném profilu

Zatěžovací stavy jsou pak přiřazeny k obecným prvkům tj.:

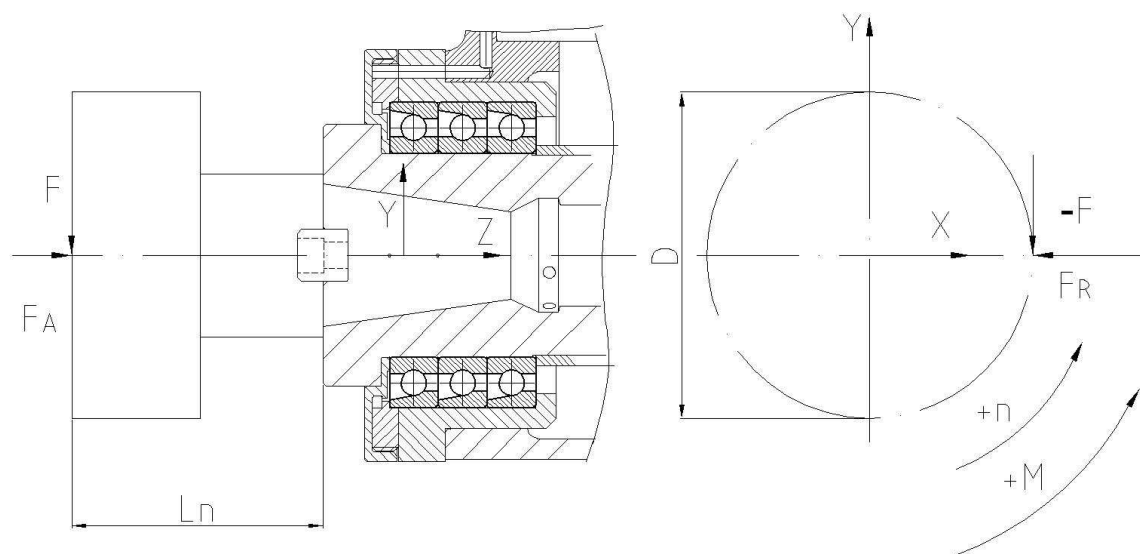
1. obecný prvek: **čelní fréza (v některých případech válcová čelní fréza):**

➤ 1. a 2. zatěžovací stav:

Řezné síly a průměr nástroje se stanoví pro 2 zatěžovací stavy (pravá a levá fréza) charakterizované obtížnými podmínkami obrábění – plným využitím P a M_L , tj. při otáčkách n_L a řezné rychlosti $v = 100$ m/min:

$$D = \frac{v}{\pi * n_L} \dots\dots\dots (73)$$

$D_I = 160$ mm



Obr. 15 – Zatížení vřetene při frézování pravou čelní frézou

Složky řezné síly jsou pak dány vztahy (Obr. 15):

Obvodová:

$$F = \frac{2 * M}{D} \dots\dots\dots (74)$$

Radiální:

$$F_R = 0,8 * F \dots\dots\dots (75)$$

Axiální:

$$F_A = 0,6 * F \dots\dots\dots (76)$$

$F = 24$ kN
$F_R = 19$ kN
$F_A = 14$ kN

Ověření parametrů se provádí pro čelní frézu o průměru 160 mm u výrobce nástrojů programem [6] – cesta: Milling, General Milling, Facemilling-roughing, T-Max 45, Arbor acc to ISO 6462 style B, Show cutterbodies: R260.7-160-30. Adaptor: Arbor acc to ISO 6462 style C single pcd: A1B05-50 40 050 , CuttingData Module.

Po dosazení dat do formuláře se stanoví veličiny: v , P , n , M , které se porovnají se zadanými hodnotami (viz [17], [6]).

➤ 3. zatěžovací stav:

Předpokládá dobré podmínky obrábění – vyšší řezná rychlost - využití výkonu P průměrem frézy D ze zátěžných stavů 1 a 2 – parametry výkonu a řezné rychlosti se stanoví příslušným programem (viz [17], [6]).

2. obecný prvek: válcová fréza:

➤ 4. zatěžovací stav:

Cílem této operace je zjistit odezvu na působení vysokého výkonu při vysokých otáčkách – volí se průměr válcové frézy odpovídající max. výkonu – parametry výkonu a řezné rychlosti se stanoví příslušným programem [17], [6].

3. obecný prvek: válcová fréza:

Pozn.: V některých případech se používá místo frézy vrták.

➤ 5. zatěžovací stav:

Cílem této operace je prověření vlivu maximálních otáček na trvanlivost a tepelnou stabilitu pro řeznou rychlost $v = 200 \text{ m.min}^{-1}$ a maximální otáčky n_M se stanoví průměr válcové frézy ze vztahu:

$$D = \frac{v}{\pi * n_M}$$

$D = 20 \text{ mm}$

Z katalogu se zvolí nejbližší průměr nástroje D . Pro tento průměr se stanoví parametry výkonu a řezné rychlosti se stanoví příslušným programem [17], [6].

4. obecný prvek: kotoučová fréza – frézování osazení:

➤ 6. zatěžovací stav:

Tato operace se volí pouze pro ověření únosnosti axiálního ložiska vřetene, které není zatěžováno většinou operací (zatěžování zprava). Obvykle se volí maximální průměr frézy z katalogu (standardní řada) a dobré obráběcí podmínky. Výkon frézy se volí co nejvyšší – je určen výpočtem [17], [6].

Pomocí programu [6] se stanoví i délka nástroje od břitu na čelo vřetene.

Poměrná doba běhu q_i při jednotlivých stavech se stanovuje odhadem s tím, že největší zatížení (stavy 1 a 2) zahrnuje 30% celkové doby běhu viz [17].

Výsledkem programu [17] je pak **Tab. 11**.

Tab. 11 - Zatěžovací stavy frézovacího vřetene

Obecný zatěž. prvek	Zatěž. stav				Poměrná doba běhu	Doba běhu [hod]	
1 Čelní fréza	1				0,25	3 500	
		Průměr nástroje	D_L	160,0	mm		
		Obvodová složka síly	F	-23,75	kN		
		Radiální složka síly	F_R	19	kN		
		Axiální složka síly	F_A	14,25	kN		
		Moment	M	1 900	Nm		
	Otáčky	n	200	min ⁻¹			
	2					0,05	700
		Obvodová složka síly	F	23,75	kN		
		Radiální složka síly	F_R	19	kN		
		Axiální složka síly	F_A	14,25	kN		
		Moment	M	-1900	Nm		
		Otáčky	n	-200	min ⁻¹		
	3					0,40	5 600
		Obvodová složka síly	F	-16,1	kN		
		Radiální složka síly	F_R	12,9	kN		
		Axiální složka síly	F_A	9,7	kN		
		Moment	M	1428	Nm		
Otáčky		n	262	min ⁻¹			
Max. délka nástroje včetně nosiče		$Ln1$	113	mm			
2 Válcová fréza	4				0,2	2 800	
		Průměr nástroje	D	50,0	mm		
		Obvodová složka síly	F	-10,7	kN		
		Radiální složka síly	F_R	8,5	kN		
		Axiální složka síly	F_A	6,4	kN		
		Moment	M	269	Nm		
	Otáčky	n	1 432	min ⁻¹			
Max. délka nástroje včetně nosiče		$Ln2$	108	mm			

Obecný zatěž. prvek	Zatěž. stav				Poměr. doba běhu	Doba běhu [hod]
3	5				0,05	700
Válcová fréza		Průměr nástroje	D	20,0	mm	
		Obvodová složka síly	F	-1,86	kN	
		Radiální složka síly	F _R	1,5	kN	
		Axiální složka síly	F _A	1,1	kN	
		Moment	M	19	Nm	
		Otáčky	n	3183	min ⁻¹	
Max. délka nástroje včetně nosiče		Ln3	108	mm		
4	6				0,05	700
Kotouč. fréza		Průměr nástroje	D	200,0	mm	
		Obvodová složka síly	F	-2,4	kN	
		Radiální složka síly	F _R	2,0	kN	
		Axiální složka síly	F _A	-1,5	kN	
		Moment	M	243	Nm	
		Otáčky	n	390	min ⁻¹	
Max. délka nástroje včetně nosiče		Ln4	86	mm		
Celková doba běhu		T _c			1	14 000

2.2 Uložení vřetene na kuličkových ložiskách s kosoúhlým stykem

Obvykle je určen průměr předního ložiska vřetene – volí se již při projektu frézovacího stroje nebo zařízení, na základě požadovaného rozměru upínací dutiny pro stopku nástroje (např. ISO50).

Volba typu ložisek a jejich uspořádání je závislá na zatěžovacích parametrech – především na silách a otáčkách – dále na požadované přesnosti (viz Tab. 3 - Kritéria pro volbu varianty uložení vřetene).

Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem jsou vhodná pro přenos radiální a axiální síly. Používají se jednotlivě nebo v sadách, které mají uspořádání T, O, X. Při užití v sadě se zvyšuje únosnost ale snižuje hodnota maximálních otáček [3].

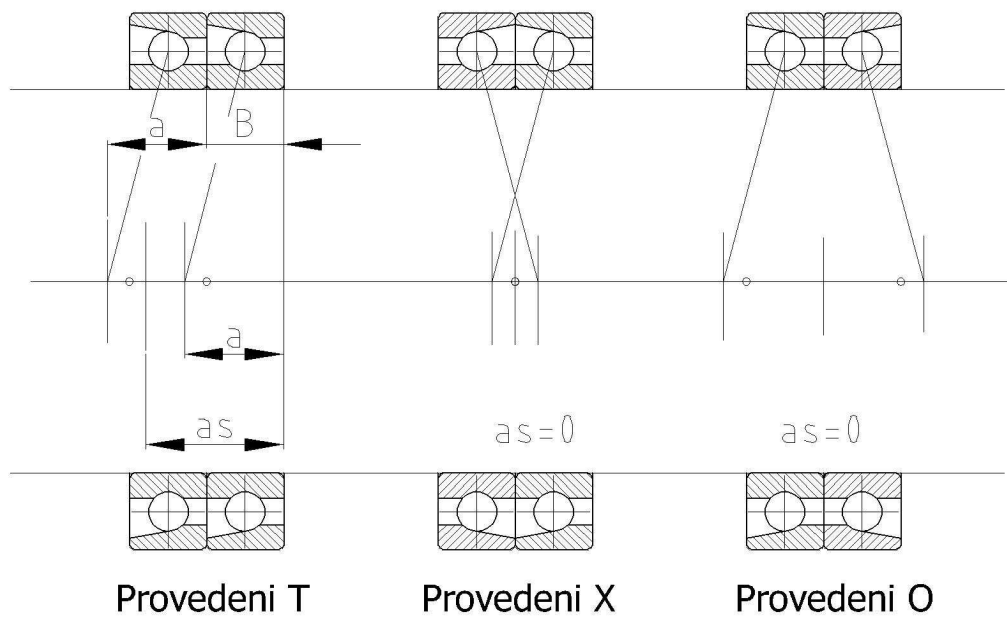
Pro únosnost a maximální otáčky sady platí vztahy:

- Dynamická únosnost:

$$C_s = i^{0.7} * C \dots\dots\dots (77)$$

- Statická únosnost:

$$C_{0s} = i * C_0 \dots\dots\dots (78)$$



Obr. 16 – Uspořádání kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem

➤ Max. otáčky sady ložisek:

$$n_s = k_{sp} * n_{1,2} \dots\dots\dots (79)$$

Kde je:

- C, C₀dynamická a statická únosnost jednotlivých ložisek
- n_{1,2}nejmenší maximální otáčky z ložisek 1(přední) a 2(zadní)
- k_{sp} redukční součinitel počtu ložisek v sadě a předpětí

Tab. 12 – Redukční součinitel počtu ložisek v sadě a předpětí k_{sp} dle [5]

Uspořádání ložisek (Obr. 16)	k _{sp}		
	Třída předpětí		
	A	B	C
2 ložiska: T	0,9	0,8	0,65
2 ložiska: O	0,8	0,7	0,55
3 ložiska	0,7	0,55	0,35
4 ložiska	0,65	0,45	0,25
5 ložisek	0,6	0,4	0,2

Třída předpětí se volí v závislosti na provozních podmínkách (otáčky – tuhost) – zvyšováním předpětí se zvyšuje tuhost a tím dynamická stabilita při obrábění.

Z Obr. 16 je zřejmé stanovení parametru a_{si} pro sadu ložisek dle vztahu:

$$a_{si} = \frac{i-1}{2} * B + a \dots\dots\dots (80)$$

Kde je:

- ipočet ložisek v sadě
- B.....šířka ložiska
- a.....charakteristický rozměr ložiska s kosoúhlým stykem

2.2.1 Kuličková ložiska s úhlem styku 15°

Př.: 10 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 15°

Dáno:

Náčrt uložení vřetene	Obr. 19 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 15°.
Zatížení	Tab. 9-Zatěžovací stavy frézovacího vřetene
Sada předních ložisek:	3xB7020C FAG – provedení T
➤ počet ložisek v sadě	$i = 3$
➤ rozměry	100/150/24
➤ charakteristický rozměr	$a = 29 \text{ mm}$
➤ dynamická únosnost	$C = 81,5 \text{ kN}$
➤ statická únosnost	$C_0 = 81,5 \text{ kN}$
➤ max. otáčky – mazání tukem	$n_1 = 8\,500 \text{ min}^{-1}$
➤ třída předpětí A pro 4 ložiska (je zahrnuta přední sada)	$k_{sp} = 0,65$
Zadní ložisko:	1xB7022C
➤ rozměry	110/170/28
➤ charakteristický rozměr	$a = 33 \text{ mm}$
➤ dynamická únosnost	$C = 110 \text{ kN}$
➤ statická únosnost	$C_0 = 110 \text{ kN}$
➤ max. otáčky – mazání tukem	$n_2 = 7\,500 \text{ min}^{-1}$
➤ třída předpětí A pro 4 ložiska	$k_{sp} = 0,65$
Finální převod – kuželová kola:	
➤ počet zubů pastorku 9	$z_9 = 22$
➤ počet zubů kola 10	$z_{10} = 22$
➤ roztečný průměr kola	$D_{10} = 166 \text{ mm}$
➤ úhel os	90°
➤ smysl sklonu pastorku 9	pravý
➤ smysl sklonu kola 10	levý
➤ účinnost záběru	$\eta = 0,96$

Stanovit:

- Charakteristické parametry sady předních ložisek (charakteristický rozměr a_s , dynamická a statická únosnost, max. otáčky)
- Bezpečnost finálního převodu
- Náčrt uložení vřetene
- Kontrolu ložisek (trvanlivost, statickou bezpečnost, bezpečnost proti přetotáčkování)
- Max. napětí a deformace
- Tuhost vřetene

Finální převod hlavního pohonu

Finálním převodem frézovacích strojů a zařízení je věnec s pastorkem opatřený čelním ozubením nebo kuželová kola. Případně i ozubený řemen. Kuželový převod (Obr. 19) frézovacího zařízení je umístěn mezi ložisky vřetene. Průměr finálního kola je dán rozměrem tělesa uložení vřetene, který obvykle patří k parametrům určujícím užitnou hodnotu stroje. Převodový poměr se určí při návrhu převodovky hlavního pohonu. Rozměry soukolí a pevnostní výpočet se stanoví v programu PREV v odstavci SAMOSTATNY VYPOCET.

Pro kontrolu převodu kuželovými koly se obvykle používá pouze nejtěžší zatěžovací stav tj. stav 1.

Moment na pastorku je pak dán vztahy:

$$i_{rs} = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{z_{10}}{z_9}$$

$$M_9 = M_{10} * \frac{1}{i_k} * \frac{1}{\eta}$$

$M_9 = 1\,979 \text{ Nm}$
$n_r = 200 \text{ min}^{-1}$

	Kolo 10	Kolo 9	Dovolená hodnota	Pozn.:
Součinitel bezpečnosti	2.83	2.83	3	vyhovuje

Údaje o převodovém prvku pro vlastní program PREV z [12]:

Kolo – převodový prvek 10:	
➤ Souřadnice polohy záběru s pastorkem 9	$Z = 259 \text{ mm}$
➤ Počet zubů	$z_{10} = 22$
➤ Modul normální	$m = 5,22 \text{ mm}$
➤ Úhel záběru	$\alpha = 17,5^\circ$
➤ Úhel sklonu zubu na středním průměru	$\beta = 32^\circ$
➤ Úhel roztečného kužele	$\delta = 45^\circ$
➤ Smysl sklonu zubu	levý
➤ Šířka ozubení	$B = 40 \text{ mm}$
Materiál	14220.4
Poloha protikola	vlevo

Pro stanovení součinitelů předního a zadního ložiska s úhlem kosoúhlého styku 15° je nutné určit axiální síly působící na kolo 10. Pro přední ložisko je vhodný 1. stav, pro zadní 6. stav.

Zatěžovací stav	M_{10}	n
	Nm	min^{-1}
1	1 900	200
6	243	390

Střední průměr kola a obvodová síla se stanoví ze vztahů:

$$D_m = D_{10} - B \sin \delta$$

$$F_{m_i} = \frac{M_{10_i}}{D_m}, \text{ pro } i = 1, 6$$

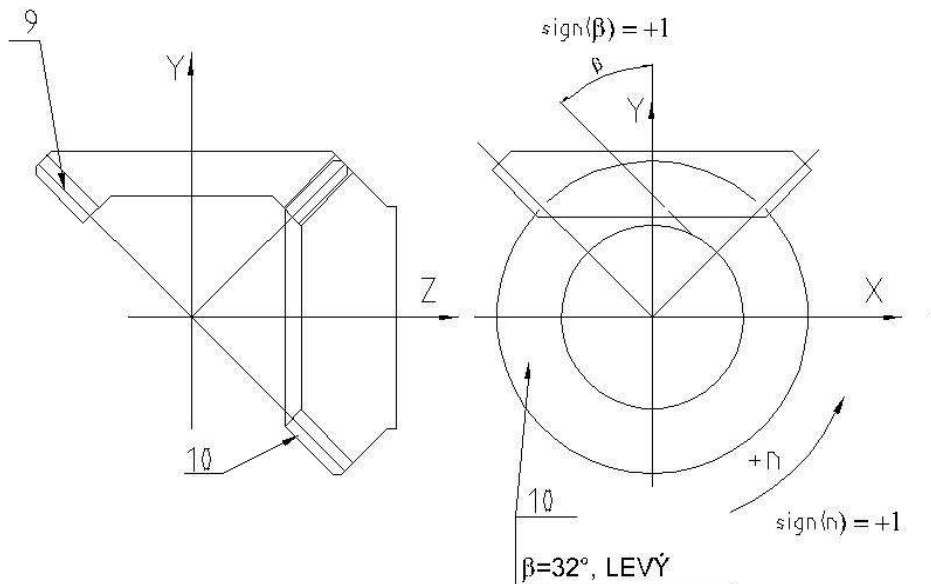
$D_m = 138 \text{ mm}$
$F_{m1} = 27,6 \text{ kN}$
$F_{m6} = 3,5 \text{ kN}$

Axiální síla je daná vztahem:

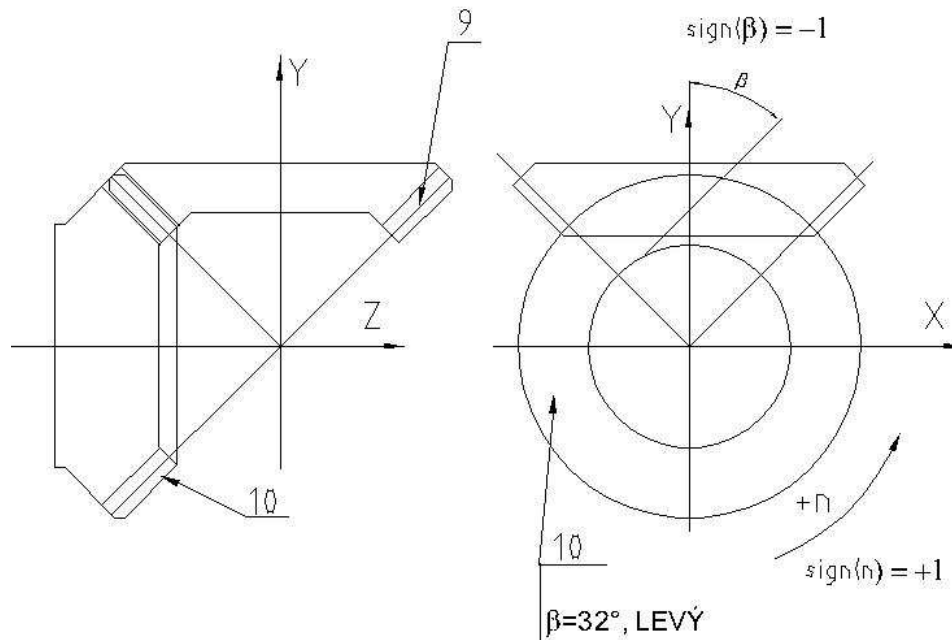
$$F_{a_i} = \frac{F_{m_i}}{\cos \beta} (\text{tg } \alpha * \sin \delta - \sin \beta * \cos \delta) \dots \dots \dots (81)$$

Platnost tohoto vztahu v soustavě dle **Obr. 19 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosouhlým stykem 15°** je podmíněna těmito údaji dle pravidel v **Obr. 17, Obr. 18:**

Úhel sklonu zubu	$\beta = 32^\circ$
Smysl otáček	$\text{sign}(n) = +1$



Obr. 17 – Finální převod kuželovými koly – uspořádání „Pastorek vlevo“



Obr. 18 - Finální převod kuželovými koly – uspořádání „Pastorek vpravo“

Do výrazu

$$F_{a_i} = \frac{F_{m_i}}{\cos \beta} (\text{tg} \alpha * \sin \delta - \sin \beta * \cos \delta) \dots \dots \dots (81)$$

Se dosadí úhel sklonu β se znaménkem, které vyplývá ze vztahu:

$$\text{sign}(\beta) \leftarrow \text{sign}(\beta) * \text{sign}(n) \dots\dots\dots (82)$$

Úhel sklonu zuby	$\beta = +32^\circ$
------------------	---------------------

Axiální síla od finálního převodu	Stav 1	$F_{a1} = -4,9 \text{ kN}$
	Stav 6	$F_{a6} = -0,63 \text{ kN}$

Celková axiální síla se stanoví pomocí vztahu:

$$F_{aci} = F_{ai} + F_{Ai} \dots\dots\dots (83)$$

kde jsou F_{A1} a F_{A6} axiální složky řezné síly stavu 1 a 6 (Tab.9).

Celková axiální síla	Stav 1 - přední ložisko	$F_{ac1} = 11,31 \text{ kN}$
	Stav 6 - zadní ložisko	$F_{ac6} = -2,13 \text{ kN}$

Ložiska:

➤ Charakteristické parametry pro výpočet životnosti:

Pro přední ložisko ekvivalentní se sadou ložisek dle **Obr. 16** platí:

$$C_s = i^{0,7} * C \dots\dots\dots (77)$$

$$C_{0s} = i * C$$

$$n_s = k_{SP} * n_{1,2}$$

$$a_{Si} = \frac{t-1}{2} * B + a$$

$C_s = 175,8 \text{ kN}$
$C_{0s} = 244,5 \text{ kN}$
$n_s = 5525 \text{ min}^{-1}$
$a_s = 53 \text{ mm}$

Dále se stanoví:

$\frac{F_{ac1}}{C_{0s}} = 0,046$

Pro tuto hodnotu se následně pomocí [5] stanoví součinitele předního ložiska s kosoúhlým stykem, které je ekvivalentní se zvolenou sadou ložisek:

F_a/C_{0s}	X1	Y1	e	X2	Y2	X0	Y0
0,046	1	0	0,43	0,44	1,32	0,5	0,46

Pro zadní ložisko se stanoví obdobně:

$\frac{F_{ac6}}{C_0} = 0,019$

F_a/C_0	X1	Y1	e	X2	Y2	X0	Y0
0,019	1	0	0,4	0,44	1,42	0,5	0,46

K těmto hodnotám lze dospět také iteračním výpočtem axiálních reakcí ložisek programem PREV z údajů tabulky dle [5].

Tab. 13 – Součinitele kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem 15° (jedno nebo tandem)

Fa/C0	e	Y2
0,015	0,38	1,47
0,029	0,4	1,4
0,058	0,43	1,3
0,087	0,46	1,23
0,12	0,47	1,19
0,17	0,5	1,12
0,29	0,55	1,02
0,44	0,56	1

➤ Max. otáčky (kinematicky přípustné) pro všechna ložiska v uložení:

Nejmenší max. otáčky sady jsou zřejmě:

$$n_{1,2} = n_2 = 7500 \text{ min}^{-1}$$

Pak se stanoví max. otáčky pomocí vztahu:

$$n_s = k_{sp} * n_{1,2}$$

..... (79):

$$n_s = 4875 \text{ min}^{-1}$$

Záběr nástroje s obrobkem

zajišťuje přenos zátěžného momentu na vřeteno – v terminologii PREV je to obecná mezihřídelová spojka označená 26 - 28.

Spojovací prvek vřetene s převodovým prvkem – kuželovým kolem 10

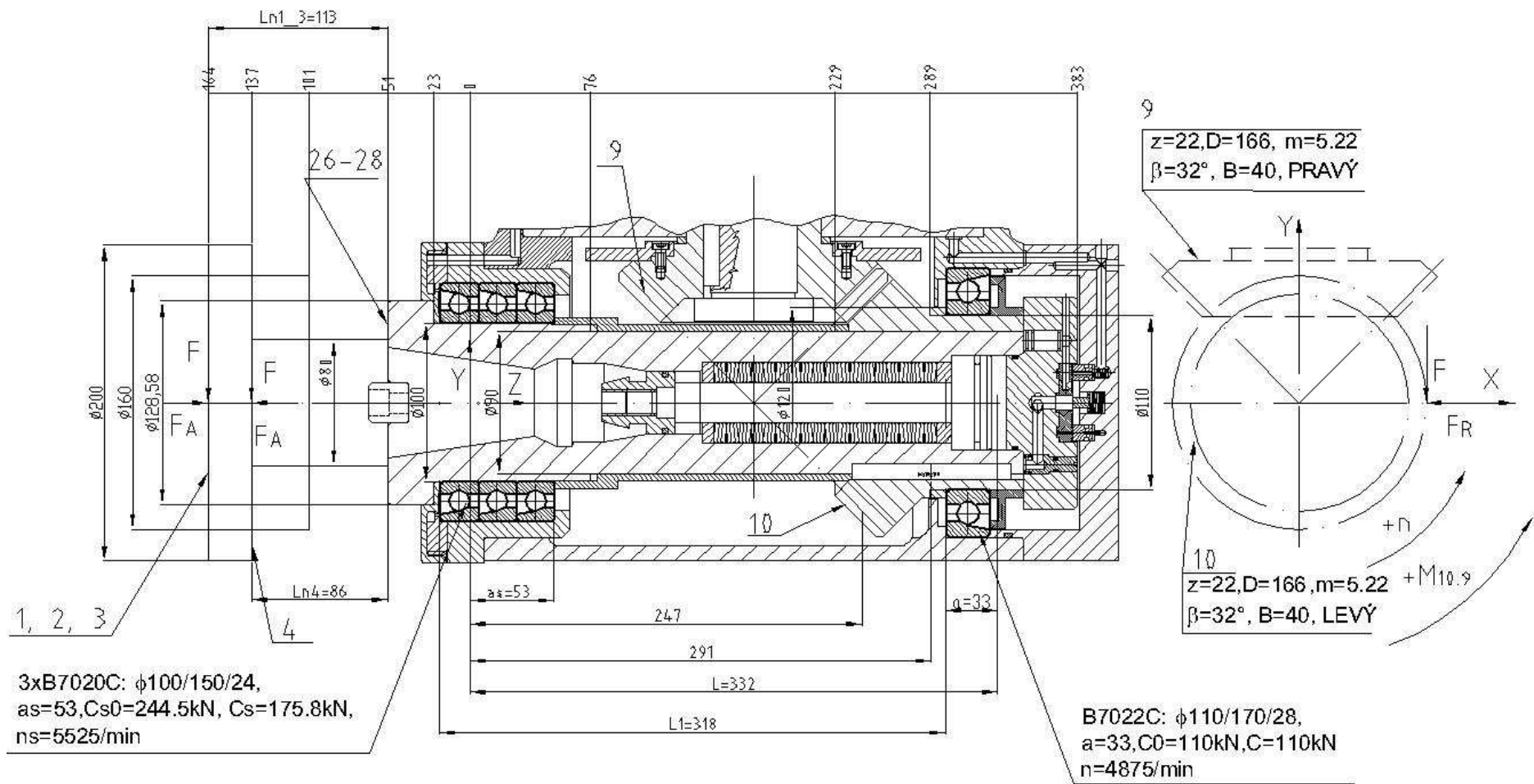
Zajišťuje přenos hnacího momentu z kuželového kola na vřeteno.

Název	Rozměry [mm]				ks
	průměr hřídele	šířka	výška	Délka	
Pero	90	16	10	100	1

2.2.1.1 Zpracování náčrtu uložení vřetene - zadání údajů do PREV

Z uvedených údajů (typ uložení, ložiska, finální převod) a z rozměru prostoru určeného projektem stroje pro vřeteník nebo pro přídatné frézovací zařízení, lze zpracovat náčrt uložení vřetene (Obr. 19 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 15°). Rozměry vřetene, umístění ložisek, převodových prvků, spojovacích prvků a obecných zátěžných prvků z tohoto náčrtu s příslušnými zatěžovacími stavy se zadají do[13].

Soubor PREV	vret2.dhl
Výstupní soubor PREV	vret2.vys



Obr. 19 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 15°

2.2.1.2 Kontrola součástí uložení vřetene

Kontrola ložisek:

Doba běhu $T_c = 14\ 000$ hod	Údaje z [13]		Dovol. hodnota	Pozn.
Ložisko přední 3xB7020C, tandem				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	5 488		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$	-	0,4	1	nevyhovuje
Potřebná únosnost pro lož. stejného typu	N	240 209		Pro dosažení doby běhu 14 000 hod
Součinitel statické bezpečnosti ložiska		5.78	3	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti přetáčkování		1.84	1	vyhovuje

Ložisko zadní 1xB7022C				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	5 599		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$		0,4		nevyhovuje
Potřebná únosnost pro lož. stejného typu	N	149 298		Pro dosažení doby běhu 14000 hod
Součinitel statické bezpečnosti ložiska		3.27	3	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti přetáčkování		1.63	1	vyhovuje

Maximální napětí v souhmotí

Stav	Souřadnice z[mm]	Údaje z [13] Napětí [MPa]	Dovolená hodnota [7]: mat.: 12050 (vřeteno) ohyb – střídavé zatížení [MPa]	Pozn.
2	76	89,8	110	vyhovuje

Deformace ve finálním převodu

		Údaje z [13]	Dovolená hodnota	Pozn.
Průhyb	[mm]	0.437E-01	0,04	vyhovuje – překročení o 9%
Sklon	[rad]	0.407E-03	0,001	vyhovuje

Zatížení spojovacího prvku

Název	Rozměry [mm]				ks
	průměr hřídele	šířka	výška	délka	
Pero	90	16	10	100	1
Dovolený tlak	MPa	120	nepřesuvný, netvrzený spoj. prvek		
Tlak [13]	MPa	80	vyhovuje		

2.2.1.3 Tuhost uložení vřetene

Tuhost uložení vřetene se vztahuje do místa působící síly a zahrnuje:

- tuhost vlastního vřetene
- tuhost ložisek
- tuhost těles, ve kterých je vřeteno uloženo

Hodnota tuhosti je určující veličinou pro přenášený výkon při frézování.

Z experimentálních výsledků [10] lze určit minimální hodnotu tuhosti na nástroji potřebnou pro dosažení určitého řezného výkonu a pro frézování keramickými nástroji.

Tuhost se stanoví v místě působící síly ve směru X tj. F_R z posunutí u_x stanoveného v [12] pro zatěžovací stavy 1 a 2:

Tuhost je pak dána vztahem:

$$k_{vx} = \frac{F_R}{u_x} \dots\dots\dots (37)$$

Tuhost vlastního vřetene

Stav	Posunutí u_x	Zatížení vřetene F_R	Tuhost k_{vx}	Pozn.
	mm	kN	kN/mm	
1	0.378E-01	19	502	Vliv finálního převodu na rozdílnost hodnot.
2	0.804E-01	19	237	

Závěr

- Tuhost vlastního vřetene je vyhovující vzhledem k mezní tuhosti 50 kN/mm odpovídající přenosu výkonu 40 kW [10]. Podrobný výpočet musí ovšem zahrnovat tuhost ložisek a tělesa.

2.2.2 Kuličková ložiska s úhlem styku 25°

Př.: 11 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 25°.

Dáno:

Náčrt uložení vřetene	Obr. 20 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 25°
Zatížení	Tab. 9-Zatěžovací stavy frézovacího vřetene
Sada předních ložisek:	3xB7020E FAG – provedení T
➤ součinitelé ložiska [2]:	$X_1 = 1, Y_1 = 0, X_2 = 0,41, Y_2 = 0,87$
➤ počet ložisek v sadě	$i = 3$
➤ rozměry	100/150/24
➤ charakteristický rozměr	$a = 41 \text{ mm}$
➤ dynamická únosnost	$C = 76,5 \text{ kN}$
➤ statická únosnost	$C_0 = 76,5 \text{ kN}$
➤ max. otáčky – mazání tukem	$n_l = 7 \text{ 500 min}^{-1}$
➤ třída předpětí A pro 4 ložiska (je zahrnuta přední sada)	$k_{sp} = 0,65$
Zadní ložisko:	1xB7022E
➤ součinitelé ložiska [2]:	$X_1 = 1, Y_1 = 0, X_2 = 0,41, Y_2 = 0,87$

	$X_0 = 1, Y_0 = 0, X_2 = 0,5, Y_2 = 0,38$
➤ rozměry	110/170/28
➤ charakteristický rozměr	$a = 47 \text{ mm}$
➤ dynamická únosnost	$C = 104 \text{ kN}$
➤ statická únosnost	$C_0 = 104 \text{ kN}$
➤ max. otáčky – mazání tukem	$n_2 = 6\,700 \text{ min}^{-1}$
➤ třída předpětí A pro 4 ložiska	$k_{sp} = 0,65$
Finální převod – kuželová kola:	
➤ počet zubů pastorku 9	$z_9 = 22$
➤ počet zubů kola 10	$z_{10} = 22$
➤ roztečný průměr kola	$D_{10} = 166 \text{ mm}$
➤ úhel os	90°
➤ smysl sklonu pastorku 9	Pravý
➤ smysl sklonu kola 10	Levý
➤ účinnost záběru	$\eta = 0,96$

Stanovit:

- Charakteristické parametry sady předních ložisek (charakteristický rozměr a_s , dynamická a statická únosnost, max. otáčky)
- Náčrt uložení vřetene
- Kontrolu ložisek (trvanlivost, statickou bezpečnost, bezpečnost proti přetáčkování)

Ložiska

- Charakteristické parametry pro výpočet životnosti:

Pro přední ložisko ekvivalentní se sadou ložisek dle **Obr. 16** platí:

$$C_S = i^{0,7} * C \dots\dots\dots (84),$$

$$C_S = i * C \dots\dots\dots (85),$$

$$n_S = k_{SP} * n_{1,2} \dots\dots\dots (86),$$

$$a_{Si} = \frac{i-1}{2} * B + a \dots\dots\dots (87):$$

$C_S = 165 \text{ kN}$
$C_{0S} = 229,5 \text{ kN}$
$n_S = 4355 \text{ min}^{-1}$
$a_s = 53 \text{ mm}$

2.2.2.1 Zpracování náčrtu uložení vřetene - zadání údajů do PREV

Z uvedených údajů (typ uložení, ložiska, finální převod) a z rozměru prostoru určeného projektem stroje pro vřeteník nebo pro přídatné frézovací zařízení lze zpracovat náčrt uložení vřetene (**Obr. 20 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 25°**). Při tvorbě náčrtu se využije většina údajů z **Obr. 19 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 15°**. Odchylné rozměrové hodnoty ložisek (a_s, a) ovlivní délku vyložení působících sil a vzdálenost mezi ložisky. Rozměry vřetene, umístění ložisek, převodových prvků a obecných zátěžných prvků se z náčrtu s příslušnými zatěžovacími stavy se zadají do PREV [14].

Soubor PREV	vret3.dhl
Výstupní soubor PREV	vret3.vys

2.2.2.2 Kontrola součástí uložení vřetene

Kontrola ložisek

Doba běhu $T_c = 14000$ hod	Údaje z [14]		Dovol. hodnota	Pozn.
Ložisko přední 3xB7020E, tandem				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	7 209		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$	-	0,5	1	nevyhovuje
Potřebná únosnost pro lož. stejného typu	N	204 614		Pro dosažení doby běhu 14 000 hod
Součinitel statické bezpečnosti ložiska		5.7	3	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti přetáčkování		1.63	1	vyhovuje

Ložisko zadní 1xB7022E				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	5915		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$		0,4		nevyhovuje
Potřebná únosnost pro lož. stejného typu	N	138 596		Pro dosažení doby běhu 14 000 hod
Součinitel statické bezpečnosti ložiska		3.29	3	Vyhovuje [5]
Bezpečnost proti přetáčkování		2.23	1	vyhovuje

Závěr

- Uložení vřetene vyhoví v případě nižší doby běhu – např. při užití ve frézovacích zařízeních kde se předpokládá doba běhu 4000 hod. Životnosti ložisek jsou poněkud vyšší než v předchozím případě (cca o 20%). Dosažení životnosti 14 000 hod by bylo schůdnější při užití ložisek s úhlem styku 25°.

2.3 Uložení vřetene na kuželíkových ložiskách

Př.: 12 – Uložení vřetene – kuželíková ložiska

Dáno:

Náčrt uložení vřetene	Obr. 21 – Uložení vřetene – kuželíková ložiska
Zatížení	Tab. 9-Zatěžovací stavy frézovacího vřetene
Přední ložisko	32020X FAG
➤ rozměry	100/150/32
➤ charakteristický rozměr	$a = 33$ mm

➤ dynamická únosnost	$C = 176 \text{ kN}$
➤ statická únosnost	$C_0 = 285 \text{ kN}$
➤ kinematicky přípustné otáčky - mazání tukem	$n_G = 4\,500 \text{ min}^{-1}$
➤ tepelně referenční otáčky	$n_B = 2\,600 \text{ min}^{-1}$
Zadní ložisko:	32022X FAG
➤ rozměry	110/170/38
➤ charakteristický rozměr	$a = 37 \text{ mm}$
➤ dynamická únosnost	$C = 240 \text{ kN}$
➤ statická únosnost	$C_0 = 400 \text{ kN}$
➤ kinematicky přípustné otáčky - mazání tukem	$n_G = 4\,000 \text{ min}^{-1}$
➤ tepelně referenční otáčky	$n_B = 2\,400 \text{ min}^{-1}$
Finální převod – kuželová kola:	
➤ počet zubů pastorku 9	$z_9 = 22$
➤ počet zubů kola 10	$z_{10} = 22$
➤ roztečný průměr kola	$D_{10} = 166 \text{ mm}$
➤ úhel os	90°
➤ smysl sklonu pastorku 9	Pravý
➤ smysl sklonu kola 10	Levý
➤ účinnost záběru	$\eta = 0,96$

Stanovit:

- Charakteristické parametry
- Náčrt uložení vřetene
- Kontrolu ložisek (trvanlivost, statickou bezpečnost, bezpečnost proti přetáčkování)

Ložiska

Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem jsou vhodná pro přenos radiální a axiální síly. Používají se obvykle jednotlivě v uspořádání O, X nebo v sadě O, X.

Pro jednotlivá ložiska dle platí :

Přední	32020X FAG					
Součinitelé pro výpočet dle katalogu [2]:						
X1	Y1	e	X2	Y2	X0	Y0
1	0	0,46	0,4	1,31	0,5	0,72

Zadní	32022X FAG					
Součinitelé pro výpočet dle katalogu FAG [1]:						
X1	Y1	e	X2	Y2	X0	Y0
1	0	0,43	0,4	1,39	0,5	0,77

2.3.1 Zpracování náčrtu uložení vřetene - zadání údajů do PREV

Z uvedených údajů (typ uložení, ložiska, finální převod) a z rozměru prostoru určeného projektem stroje pro vřeteník nebo pro přídatné frézovací zařízení lze zpracovat náčrt uložení vřetene (Obr. 21 – Uložení vřetene – kuželíková ložiska). Při tvorbě náčrtu se využije většina údajů z Obr. 20 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 25° . Odchylné rozměrové hodnoty ložisek (a_s , a)

ovlivní délku vyložení působících sil a vzdálenost mezi ložisky. Rozměry vřetene, umístění ložisek, převodových prvků a obecných zátěžných prvků se z náčrtu (Obr. 21) s příslušnými zatěžovacími stavy se zadají do [15].

Soubor PREV	vret4.dhl
Výstupní soubor PREV	vret4.vys

2.3.2 Kontrola součástí uložení vřetene

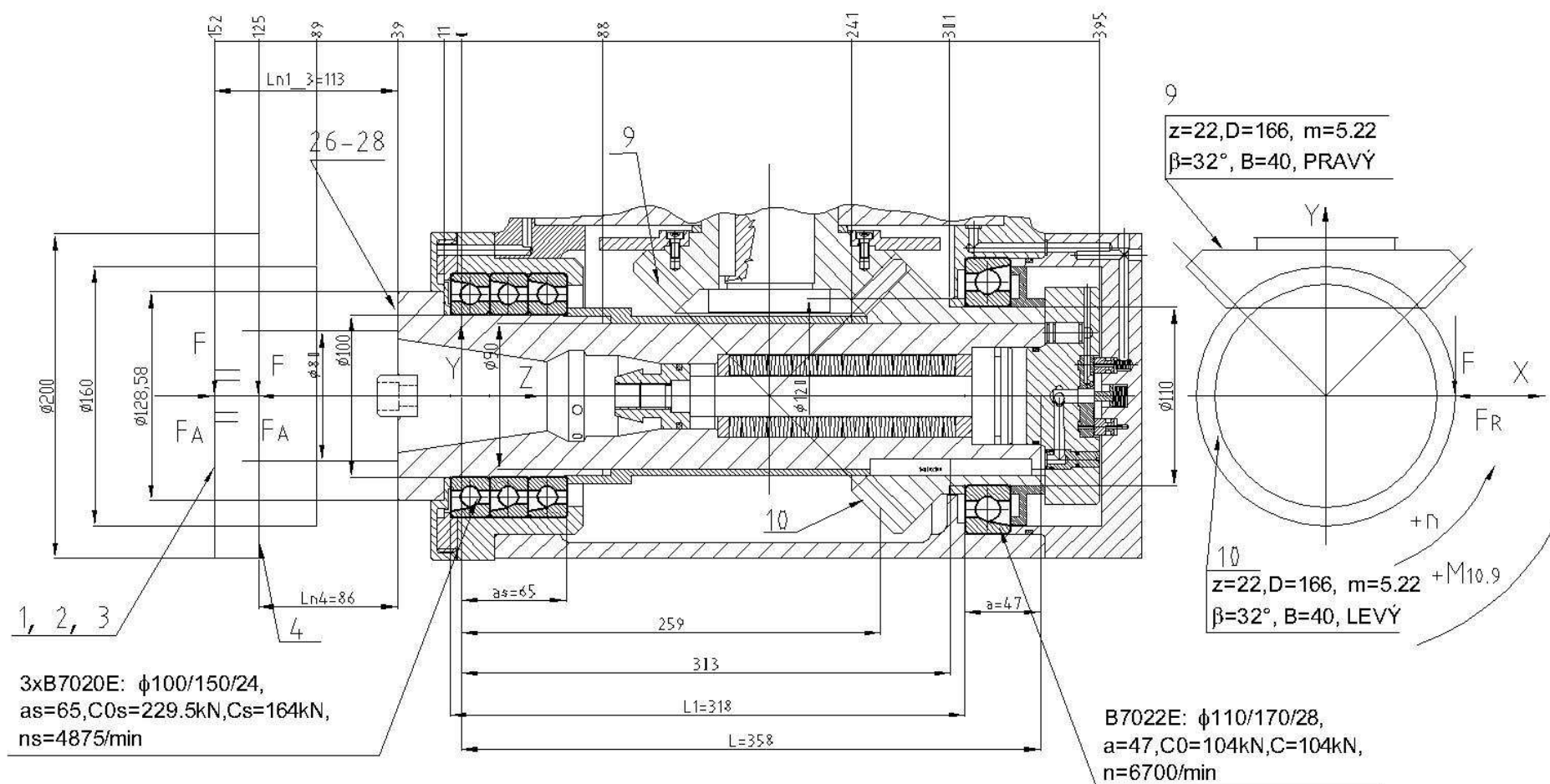
Kontrola ložisek

Doba běhu $T_c = 14000$ hod	Údaje z [15]		Dovol. hodnota	Pozn.
Ložisko přední 32020X				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	11 777		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$	-	0,84	1	nevyhovuje
Potřebná únosnost pro lož. stejného typu	N	18 5370		Pro dosažení doby běhu 14 000 hod
Součinitel statické bezpečnosti ložiska		5,75	5	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti přetáčkování		0,87	1	nevyhovuje – nutno provést výpočet tepelně přípustných otáček
Sklon vřetene v ložisku	rad	0,7e-3	1,1e-3	Vyhovuje – dov. hodnota dle Tab. 8

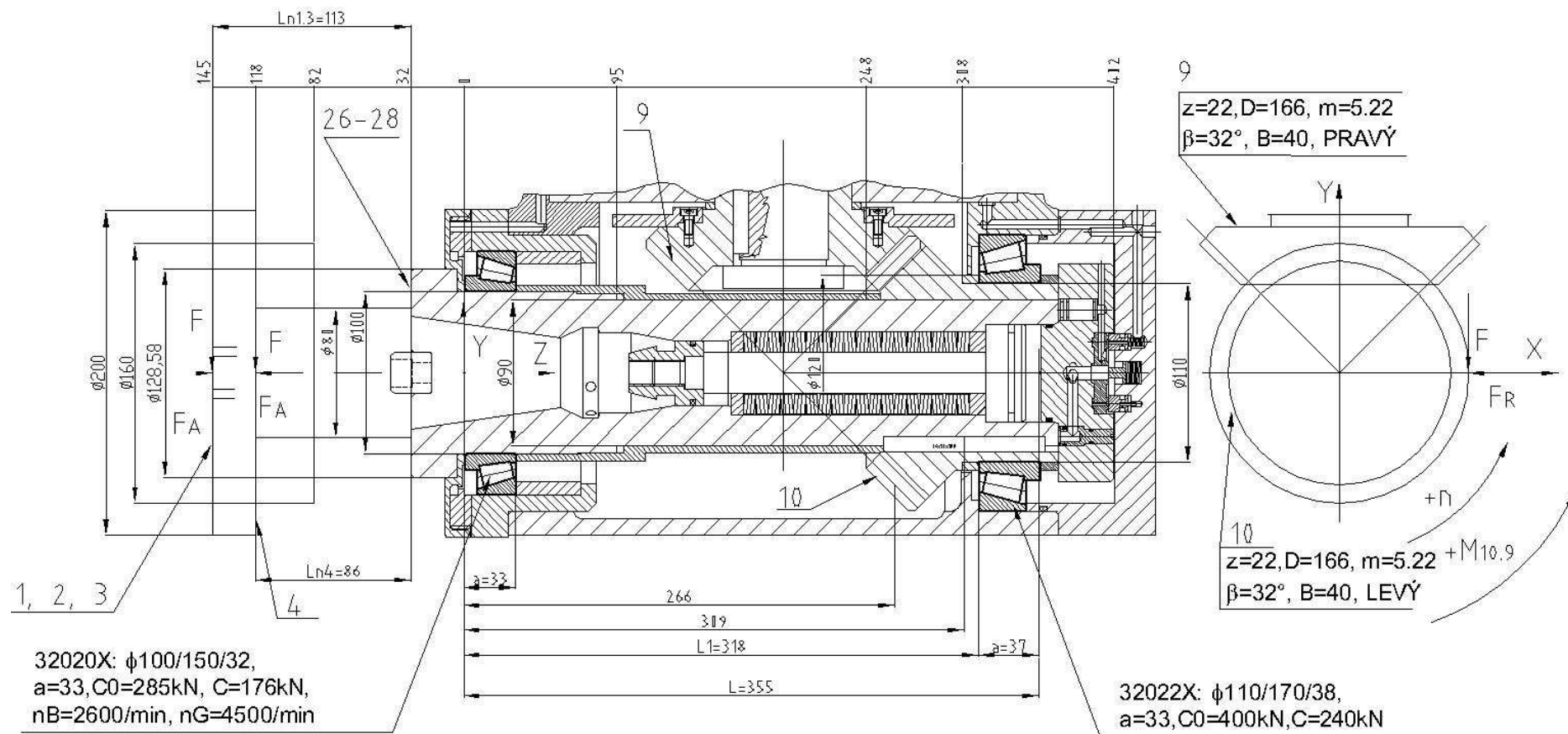
Ložisko zadní 32022X				
Trvanlivost ložiska T_L	hod	160 219		
Součinitel dynamické bezpečnosti ložiska $\frac{T_L}{T_c}$		11,4		Vyhovuje
Potřebná únosnost pro lož. stejného typu	N	138 596		Pro dosažení doby běhu 14 000 hod
Součinitel statické bezpečnosti ložiska		12	5	vyhovuje [5]
Bezpečnost proti přetáčkování		0,8	1	nevyhovuje – nutno provést výpočet tepelně bezpečných otáček
Sklon vřetene v ložisku	rad	0,54e-3	1,1e-3	Vyhovuje – dov. hodnota dle Tab. 8

Závěr

- Uložení vřetene vyhoví pro danou dobu běhu (pouze mírné poddimenzování předního ložiska). Ložiska však pravděpodobně nevyhovují vzhledem k maximálním otáčkám, kde by bylo nutné, provést výpočet tepelně bezpečných otáček programem MitCalc dle [18].



Obr. 20 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 25°



Obr. 21 – Uložení vřetene – kuželíková ložiska

SEZNAMY

Seznam tabulek

Tab. 1 – Základní parametry uložení vřeten soustruhů	1
Tab. 2 – Zatěžovací stavy vřetene soustruhu [15].....	6
Tab. 3 - Kritéria pro volbu varianty uložení vřetene.....	10
Tab. 4 - Provozní kin. viskozita maziva [mm ² /s].....	15
Tab. 5 – Tepelný výkon ložiska a přestup tepla.....	20
Tab. 6 – Tepelně přípustné otáčky	21
Tab. 7 – Vnitřní rozměry ložisek	24
Tab. 8 - Přípustné hodnoty sklonu hřídele v ložisku [1]	29
Tab. 9 – Bezrozměrné součinitelé hydrostatického radiálního ložiska.....	30
Tab. 10 - Základní parametry uložení vřeten frézovacích a vyvrtávacích strojů.....	37
Tab. 11 - Zatěžovací stavy frézovacího vřetene.....	41
Tab. 12 – Redukční součinitel počtu ložisek v sadě a předpětí k_{sp} dle [4].....	43
Tab. 13 – Součinitele kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem 15°(jedno nebo tandem)	48

Seznam příkladů

Př.: 1- Zatěžovací stavy vřetene soustruhu.....	2
Př.: 2 - Maximální zatížení ložisek vřetene soustruhu	8
Př.: 3 – Přiřazení ložisek vřetene soustruhu	11
Př.: 4 – Tepelně bezpečné provozní otáčky axiálního válečkového ložiska	16
Př.: 5 – Tuhost vlastního vřetene a ložisek v místě hrotu ve směru X.....	23
Př.: 6 – Tuhost vlastního vřetene a ložisek v místě hrotu ve směru Y	26
Př.: 7 – Kontrola součástí uložení vřetene dle výstupního souboru programu	28
Př.: 8 – Charakteristické parametry hydrostatického ložiska.....	30
Př.: 9 – Zatěžovací stavy frézovacího vřetene.....	37
Př.: 10 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 15°	44
Př.: 11 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 25°	51
Př.: 12 – Uložení vřetene – kuželíková ložiska.....	53

Seznam obrázků

Obr. 1- Zatížení vřetene a koníka soustruhu	1
Obr. 2 – Závislost výkonu a momentu na otáčkách vřetene	2
Obr. 3 – Orientace sil, momentu a otáček v souřadné soustavě programu PREV	5
Obr. 4 - Házení konce vřetene.....	7
Obr. 5 - Maximální zatížení ložisek vřetene	8
Obr. 6 – Uložení vřetene soustruhu – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem.....	9
Obr. 7 – Uložení vřetene soustruhu – kuželíková ložiska.....	10
Obr. 8 – Předpětí axiálních ložisek	13
Obr. 9 – Uložení vřetene soustruhu – radiální válečková, axiální válečková ložiska.....	14
Obr. 10 – Referenční viskozita v1 oleje a provozní teplota ložiska [2]	17
Obr. 11 – Proud oleje v závislosti na třecím výkonu ložiska [2]	20
Obr. 12 – Uložení vřetene soustruhu – přední radiální hydrostatické ložisko	33
Obr. 13 – Hydrostatické ložisko.....	34
Obr. 14 – Obecné prvky – umístění na nosném profilu	38
Obr. 15 – Zatížení vřetene při frézování pravou čelní frézou	39
Obr. 16 – Uspořádání kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem	43
Obr. 17 – Finální převod kuželovými koly – uspořádání „Pastorek vlevo“	46

Obr. 18 - Finální převod kuželovými koly – uspořádání „Pastorek vpravo“	46
Obr. 19 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 15°	49
Obr. 20 – Uložení vřetene – kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 25°	57
Obr. 21 – Uložení vřetene – kuželíková ložiska	58

Seznam použité literatury

Firemní literatura (katalogy, www.)

- [2] [FAG 1995] FAG Rolling Bearings: Katalog, 1995
- [3] INA Schaeffler KG: [cit.2013-08-12]. Dostupné z: [http:// www.ina.de/](http://www.ina.de/)
- [4] INA Nadellager, Zylinderrollerlager: Katalog, 1992
- [5] SKF Precision bearing: Katalog, 1991
- [6] SANDVIK Coromant (online): [cit.2013-08-12]. Dostupné z: [/http://www.coroguide.com/](http://www.coroguide.com/)

Publikace

- [7] BOLEK, A., KOCHMAN, J. Části strojů, 1. svazek. Praha: SNTL, 1982,
- [8] BRENÍK, P., PÍČ, J. Obráběcí stroje, Konstrukce a výpočty. Praha, SNTL, 1982
- [9] FROHLICH, J. Technika uložení s valivými ložisky. Praha: SNTL, 1978
- [10] HUDEC, Z. Tuhost obráběcích strojů. Plzeň: ZČU, 2013. ISBN 978-80-261-0388-2

Přílohy

- [11] Program PREV: soubory: vreteno1.dhl, vreteno1.vys. Plzeň: ZČU, 2008
- [12] Program PREV – samostatný výpočet - výsledky: fin_prev_vret2.vys. Plzeň: ZČU, 2008
- [13] Program PREV: soubory: vret2.dhl, vret2.vys, Plzeň: ZČU, 2008
- [14] Program PREV: soubory: vret3.dhl, vret3.vys. Plzeň: ZČU, 2008
- [15] Program PREV: soubory: vret4.dhl, vret4.vys. Plzeň: ZČU, 2008
- [16] Program Mathcad: soubor: zat_sta_1.xml. Plzeň: ZČU, 2014
- [17] Program Excel: soubor: zat_stavy_frez.xls. Plzeň: ZČU, 2008
- [18] Program Excel - MitCalc: soubor: BearingFAG11.xls. Plzeň: ZČU, 2010
- [19] Program Excel: soubor: ziv_stroje.xls. Plzeň: ZČU, 2013

KKS/KVS,KOS ULOŽENÍ VŘETENE - PŘÍKLADY

doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.

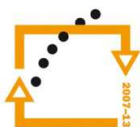
Vydavatel: Západočeská univerzita v Plzni, Vydavatelství
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň
tel.: 377 631 951
e-mail: vydavatel@vyd.zcu.cz

Katedra: konstruování strojů
Vedoucí katedry: doc. Ing. Václava Lašová, CSc.
Určeno: pro studenty FST
Vyšlo: červen 2013
Počet stran: 68
Nositelé
autorských práv: doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.
Západočeská univerzita v Plzni
Vydání: 1. vydání, on-line

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky v rámci projektu
č. CZ.1.07/2.2.00/07.0235 „Inovace výuky v oboru konstruování strojů včetně jeho teoretické, metodické a počítačové podpory“.