

**ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ**

Ú12113 – Ústav konstruování a částí strojů



**TECHNICKÁ ZPRÁVA**

**ČELNÍ DVOUSTUPŇOVÁ PŘEVODOVKA**

**KAREL BALÁŠ**

# Obsah

1	Zadání .....	1
2	Návrh pohonu.....	2
2.1	Návrh elektromotoru .....	2
2.1.1	Návrhový výkon.....	2
2.1.2	Otáčky bubnu.....	2
2.1.3	Návrhové otáčky .....	2
2.1.4	Volba elektromotoru .....	2
2.1.5	Reálný výkon na bubnu .....	2
2.2	Rozdělení převodů.....	2
2.2.1	Řemenový převod .....	2
2.2.2	Převodový poměr 3,4.....	2
2.2.3	Převodový poměr 1,2.....	2
3	Návrh převodovky.....	3
3.1	Počty zubů, konečné rozdělení převodů .....	3
3.1.1	Počet zubů kola 2.....	3
3.1.2	Počet zubů kola 4.....	3
3.1.3	Konečný převodový poměr 1,2.....	3
3.1.4	Konečný převodový poměr 3,4.....	3
3.1.5	Konečný celkový převodový poměr .....	3
3.1.6	Odchylka celkového převodového poměru od návrhového .....	3
3.2	Kroutící momenty, otáčky hřídelů.....	3
3.2.1	Kroutící moment – motor .....	3
3.2.2	Kroutící moment – vstupní hřídel .....	3
3.2.3	Kroutící moment – předlohová hřídel.....	3
3.2.4	Kroutící moment – výstupní hřídel .....	3
3.2.5	Kroutící moment – buben.....	3
3.2.6	Otáčky – vstupní hřídel.....	4
3.2.7	Otáčky – předlohová hřídel.....	4
3.2.8	Otáčky – výstupní hřídel.....	4
3.2.9	Odchylka otáček výstupní hřídele a bubnu.....	4
3.3	Návrh spojky .....	4
3.3.1	Zubová naklápěcí spojka.....	4
3.4	Návrh hřídelů .....	4
3.4.1	Vstupní hřídel.....	4
3.4.2	Předlohová hřídel .....	4
3.4.3	Výstupní hřídel .....	4
3.5	Návrh modulu ozubení.....	5

3.5.1	Modul soukolí 1,2 .....	5
3.5.2	Modul soukolí 3,4 .....	5
3.6	Rozměry ozubených kol .....	5
3.6.1	Rozměry pastorku 1 .....	5
3.6.2	Rozměry kola 2 .....	5
3.6.3	Rozměry pastorku 3 .....	5
3.6.4	Rozměry kola 4 .....	5
3.6.5	Osová vzdálenost 1,2 .....	6
3.6.6	Osová vzdálenost 3,4 .....	6
3.6.7	Požadovaná osová vzdálenost 1,2 .....	6
3.6.8	Požadovaná osová vzdálenost 3,4 .....	6
3.6.9	Korekce ozubení .....	6
3.6.9.1	Korekce pastorku 1 .....	6
3.6.9.2	Korekce kola 2 .....	6
3.6.9.3	Korekce pastorku 3 .....	6
3.6.9.4	Korekce kola 4 .....	6
3.6.10	Šířka ozubení pastorku 1 .....	6
3.6.11	Šířka ozubení kola 2 .....	6
3.6.12	Šířka ozubení pastorku 3 .....	6
3.6.13	Šířka ozubení kola 4 .....	6
3.7	Návrh řemenového převodu .....	6
3.7.1	Geometrický převod .....	6
3.7.2	Návrh řemenu .....	7
3.7.3	Průměr velké řemenice .....	7
3.7.4	Délka řemene .....	7
3.7.5	Skutečná osová vzdálenost .....	7
3.7.6	Počet řemenů řemenového převodu .....	7
3.7.7	Šířka řemenice .....	7
3.7.8	Obvodové rychlosti .....	7
3.7.9	Síly v řemenovém převodu .....	8
3.8	Koncepční návrh 1 .....	8
4	Kontrolní výpočty .....	9
4.1	Kontrola ozubení 1,2 .....	9
4.2	Kontrola ozubení 3,4 .....	10
4.3	Síly v ozubení .....	11
4.3.1	Tečné síly .....	11
4.3.1.1	Tečná síla pastorku 1 .....	11
4.3.1.2	Tečná síla kola 2 .....	11
4.3.1.3	Tečná síla pastorku 3 .....	11

4.3.1.4	Tečná síla kola 4 .....	11
4.3.2	Radiální síly .....	11
4.3.2.1	Radiální síla pastorku 1 .....	11
4.3.2.2	Radiální síla kola 2 .....	11
4.3.2.3	Radiální síla pastorku 3 .....	11
4.3.2.4	Radiální síla kola 4 .....	11
4.3.3	Axiální síly .....	11
4.3.3.1	Axiální síla pastorku 1 .....	11
4.3.3.2	Axiální síla kola 2 .....	11
4.3.3.3	Axiální síla pastorku 3 .....	11
4.3.3.4	Axiální síla kola 4 .....	11
4.4	Reakce v ložiskách .....	12
4.4.1	Vstupní hřídel – normální chod .....	12
4.4.2	Vstupní hřídel – zpětný chod .....	13
4.4.3	Předlohová hřídel – normální chod .....	14
4.4.4	Předlohová hřídel – zpětný chod .....	15
4.4.5	Výstupní hřídel – normální chod .....	16
4.4.6	Výstupní hřídel – zpětný chod .....	17
4.5	Návrh ložisek .....	18
4.5.1	Vstupní hřídel .....	18
4.5.1.1	Ložisko A .....	18
4.5.1.2	Ložisko B .....	18
4.5.2	Předlohová hřídel .....	19
4.5.2.1	Ložisko C .....	19
4.5.2.2	Ložisko D .....	19
4.5.3	Výstupní hřídel .....	20
4.5.3.1	Ložisko E .....	20
4.5.3.2	Ložisko F .....	20
4.6	Statická kontrola hřídelů .....	21
4.6.1	Vstupní hřídel .....	21
4.6.1.1	Průběh ohybových momentů – normální chod .....	21
4.6.1.2	Průběh ohybových momentů – zpětný chod .....	22
4.6.1.3	Maximální ohybový moment .....	22
4.6.1.4	Redukované napětí .....	22
4.6.2	Předlohová hřídel .....	23
4.6.2.1	Průběh ohybových momentů – normální chod .....	23
4.6.2.2	Průběh ohybových momentů – zpětný chod .....	24
4.6.2.3	Maximální ohybový moment .....	24
4.6.2.4	Redukované napětí .....	24

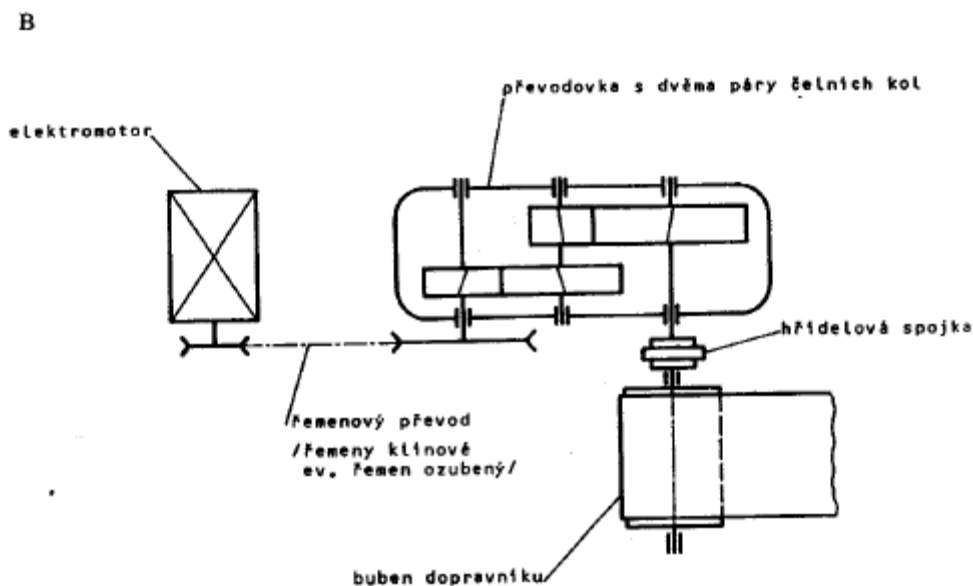
4.6.3	Výstupní hřídel .....	25
4.6.3.1	Průběh ohybových momentů – normální chod .....	25
4.6.3.2	Průběh ohybových momentů – zpětný chod .....	26
4.6.3.3	Maximální ohybový moment .....	26
4.6.3.4	Redukované napětí .....	26
4.7	Koncepční návrh 2 .....	27
5	Spoje náboj – hřídel .....	28
5.1	Návrh připojení řemenice .....	28
5.1.1.1	Návrh těsného pera .....	28
5.1.1.2	Délka těsného pera .....	28
5.1.1.3	Kontrola otlacení těsného pera .....	28
5.1.1.4	Kontrola střihu těsného pera .....	28
5.2	Návrh připojení kola 2 na předlohovou hřídel .....	28
5.2.1.1	Návrh drážkování .....	28
5.2.1.2	Minimální délka drážkování .....	28
5.2.1.3	Kontrola otlacení v drážkování .....	28
5.3	Návrh připojení kola 4 na výstupní hřídel .....	29
5.3.1.1	Návrh lisování .....	29
5.3.1.2	Minimální tlak ve spoji .....	29
5.3.1.3	Minimální přesah .....	29
5.3.1.4	Lisování za studena .....	29
5.3.1.4.1	Minimální výrobní přesah .....	29
5.3.1.4.2	Návrh uložení .....	29
5.3.1.4.3	Minimální přesah dle uložení .....	29
5.3.1.5	Lisování za tepla .....	29
5.3.1.5.1	Minimální výrobní přesah .....	29
5.3.1.5.2	Návrh uložení .....	29
5.3.1.5.3	Minimální přesah dle uložení .....	29
5.3.1.6	Maximální tlak ve spoji za studena/za tepla .....	29
5.3.1.6.1	Za studena .....	29
5.3.1.6.2	Za tepla .....	29
5.3.1.7	Maximální tlak ve spoji .....	30
5.3.1.8	Redukované napětí .....	30
5.3.1.9	Bezpečnost .....	30
5.3.1.10	Potřebná lisovací síla pro lisování .....	30
5.3.1.11	Potřebné ohřátí náboje pro lisování .....	30
6	Dynamická kontrola vstupní hřídele .....	31
6.1	Kontrola únavové pevnosti .....	31
6.2	Kontrola tuhosti .....	32

6.2.1	Průhyb hřídele .....	32
6.2.2	Natočení hřídele.....	32
6.2.3	Dovolené hodnoty průhybů, průhybů v ozubení a natočení v kolech a natočení v podporách .....	32
6.2.4	Průhyb mezi ložisky .....	33
6.2.5	Průhyb v ozubení .....	33
6.2.6	Natočení v ozubení .....	33
6.2.7	Natočení v podporách.....	33
6.2.8	Maximální průhyb.....	33
7	Závěr.....	34
8	Seznam použité literatury .....	34

# 1 Zadání

Navrhněte dvoustupňovou převodovku se šikmými zuby s řemenovým převodem na vstupu převodovky a zubovou naklápěcí spojkou na výstupu převodovky dle zadaných hodnot.

Hodnoty:	Výkon bubnu	$P_b = 6 \text{ kW}$
	Průměr bubnu	$D_b = 0,4 \text{ m}$
	Rychlost bubnu	$v_b = 1,7 \text{ ms}^{-1}$
	Trvanlivost ložisek	$L_h = 25 \text{ 000 hodin}$



Ostatní hodnoty (zadané/zvolené):

Účinnost převodu 1,2;3,4	$\eta_{1,2;3,4} = 0,98$
Účinnost bubnu	$\eta_{BUB} = 0,95$
Účinnost spojky	$\eta_{SPOJ} = 0,995$
Účinnost řemene	$\eta_{ŘEM} = 0,92$
Počet zubů pastorku 1	$Z_1 = 26$
Počet zubů pastorku 3	$Z_3 = 25$
Celkový převodový poměr	$i_c' = 35,5$
Návrh. konst. vstup. hřídele	$A_I = 130$
Návrh. konst. předloh. hřídele	$A_{II} = 115$
Návrh. konst. výstup. hřídele	$A_{III} = 105$
Materiál kol	14 220 (16MnCr5)
Mez únavy kol (bázová hod.)	$\sigma_{LIMB} = 700 \text{ MPa}$
Mez kluzu kol	$\sigma_{Kt} = 490 \text{ MPa}$
Součinitel pro kalená kola	$f_p = 18$
Součinitel přidav. zatížení	$K_f = 1,25$
Poměrná šířka kola	$\psi_M = 18$
Dovolené napětí kol	$\sigma_{FP} = 420 \text{ MPa}$
Úhel sklonu zubu kol 1,2	$\beta_{1,2} = 10^\circ$
Úhel sklonu zubu kol 3,4	$\beta_{3,4} = 8^\circ$
Skluz řemenu	$\xi = 0,018$
Dovolené napětí hřídelů	$\sigma_D = 70 \text{ MPa}$
Dovolené otačení hřídelů	$p_D = 70 \text{ MPa}$
Dovolený střih per	$\tau_D = 70 \text{ MPa}$

## 2 Návrh pohonu

### 2.1 Návrh elektromotoru

#### 2.1.1 Návrhový výkon

$$P'_M = \frac{P_b}{\eta_c} = \frac{P_b}{\eta_{1,2} * \eta_{3,4} * \eta_{\check{R}EM} * \eta_{BUB} * \eta_{SPOJ}} = \frac{6\ 000}{0,98 * 0,98 * 0,92 * 0,95 * 0,998} = 7\ 183\ W \cong 7,18\ kW$$

#### 2.1.2 Otáčky bubnu

$$v = r_b * \omega = r_b * 2 * \pi * n_b \Rightarrow n_b = \frac{v_b * 60}{\pi * D_b} = \frac{1,7 * 60}{\pi * 0,4} = 81,2\ min^{-1}$$

#### 2.1.3 Návrhové otáčky

$$n'_m = i'_c * n_b = 33,5 * 81,2 = 2\ 882\ min^{-1}$$

#### 2.1.4 Volba elektromotoru

Volím 2-pólový elektromotor *SIEMENS 1LE1002-1CA13*

$$n_m = 2\ 925\ min^{-1}$$

$$P_m = 7,5\ kW$$

#### 2.1.5 Reálný výkon na bubnu

$$P_{bREAL} = P_m * \eta_c = P_m * \eta_{1,2} * \eta_{3,4} * \eta_{\check{R}EM} * \eta_{BUB} * \eta_{SPOJ} = \frac{7\ 500}{0,98 * 0,98 * 0,92 * 0,95 * 0,995} = 6\ 264\ W \cong 6,3\ kW$$

## 2.2 Rozdělení převodů

### 2.2.1 Řemenový převod

Řemenový převod volím  $i_{\check{R}EM} = 1,5$

### 2.2.2 Převodový poměr 3,4

Převodový poměr 1,2 bude 1,4x větší, než převodový poměr 3,4

$$i'_{1,2} \cong 1,4 * i'_{3,4}$$

$$i'_c = i'_{1,2} * i'_{3,4} * i_{\check{R}EM} = 1,4 * i'_{3,4}^2 * i_{\check{R}EM} \Rightarrow i'_{3,4} = \sqrt{\frac{i'_c}{1,4 * i_{\check{R}EM}}} = \sqrt{\frac{35,5}{1,4 * 1,5}} = 4,11$$

### 2.2.3 Převodový poměr 1,2

$$i'_{1,2} = 1,4 * i'_{3,4} = 1,4 * 4,11 = 5,76$$



## 3 Návrh převodovky

### 3.1 Počty zubů, konečné rozdělení převodů

#### 3.1.1 Počet zubů kola 2

$$i'_{1,2} = \frac{z'_2}{z_1} \Rightarrow z'_2 = z_1 * i'_{1,2} = 26 * 5,76 = 149,66 \text{ zubů}$$

Volím  $z_2 = 150$  zubů

#### 3.1.2 Počet zubů kola 4

$$i'_{3,4} = \frac{z'_4}{z_3} \Rightarrow z'_4 = z_3 * i'_{3,4} = 25 * 5,11 = 102,79 \text{ zubů}$$

Volím  $z_4 = 103$  zubů

#### 3.1.3 Konečný převodový poměr 1,2

$$i_{1,2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{150}{26} = 5,77$$

#### 3.1.4 Konečný převodový poměr 3,4

$$i_{3,4} = \frac{z_4}{z_3} = \frac{103}{25} = 4,12$$

#### 3.1.5 Konečný celkový převodový poměr

$$i_c = i_{1,2} * i_{3,4} * i_{REM} = 5,77 * 4,12 * 1,5 = 35,65$$

#### 3.1.6 Odchylka celkového převodového poměru od návrhového

$$\Delta i_c = \frac{i_c - i'_c}{i_c} * 100 = \frac{35,65 - 35,5}{35,65} * 100 = 0,43 \% < 4 \%$$

**VYHOVUJE**

## 3.2 Kroutící momenty, otáčky hřídelů

#### 3.2.1 Kroutící moment – motor

$$M_{kMOT} = 9550 * \frac{P_M}{n_M} = 9550 * \frac{7,5}{2925} = 24,49 Nm$$

#### 3.2.2 Kroutící moment – vstupní hřídel

$$M_{kH1} = M_{kMOT} * i_{REM} * \eta_{REM} = 24,49 * 1,5 * 0,92 = 33,79 Nm$$

#### 3.2.3 Kroutící moment – předlohová hřídel

$$M_{kH2} = M_{kH1} * i_{1,2} * \eta_{1,2} = 33,79 * 5,77 * 0,98 = 191,06 Nm$$

#### 3.2.4 Kroutící moment – výstupní hřídel

$$M_{kH3} = M_{kH2} * i_{3,4} * \eta_{3,4} = 191,06 * 4,12 * 0,98 = 771,41 Nm$$

#### 3.2.5 Kroutící moment – buben

$$M_{kBUB} = M_{kH3} * \eta_{SPOJ} * \eta_{BUB} = 771,41 * 0,995 * 0,95 = 767,55 Nm$$

### 3.2.6 Otáčky – vstupní hřídel

$$n_{H1} = \frac{n_M}{i_{REM}} = \frac{2\,925}{1,5} = 1\,950 \text{ min}^{-1}$$

### 3.2.7 Otáčky – předloková hřídel

$$n_{H1} = \frac{n_{H1}}{i_{1,2}} = \frac{1\,950}{5,77} = 338 \text{ min}^{-1}$$

### 3.2.8 Otáčky – výstupní hřídel

$$n_{H3} = \frac{n_{H2}}{i_{3,4}} = \frac{338}{4,12} = 82 \text{ min}^{-1}$$

### 3.2.9 Odchylka otáček výstupní hřídele a bubnu

$$\Delta n_b = \frac{n_{H3} - n_b}{n_{H3}} * 100 = \frac{82 - 81,2}{82} * 100 = 1,1 \% < 4 \%$$

**VYHOVUJE**

## 3.3 Návrh spojky

### 3.3.1 Zubová naklápěcí spojka

$$M_{kSPOJ} = 1,5 * M_{kH3} = 1,5 * 771,41 = 1\,157 \text{ Nm}$$

Volím spojku GFA – 40LL

$$M_{kNOM} = 1\,250 \text{ Nm}; M_{kMAX} = 3\,125 \text{ Nm}$$

## 3.4 Návrh hřídelů

### 3.4.1 Vstupní hřídel

$$d_{H1} = A_I \sqrt[3]{\frac{P_{H1}}{n_{H1}}} = 130 * \sqrt[3]{\frac{7,5 * 0,92}{1\,950}} = 19,81 \text{ mm}$$

Volím  $d_{H1} = 25 \text{ mm}$

### 3.4.2 Předloková hřídel

$$d_{H2} = A_{II} \sqrt[3]{\frac{P_{H2}}{n_{H2}}} = 115 * \sqrt[3]{\frac{7,5 * 0,92 * 0,98}{338}} = 31,22 \text{ mm}$$

Volím  $d_{H2} = 35 \text{ mm}$

### 3.4.3 Výstupní hřídel

$$d_{H3} = A_{III} \sqrt[3]{\frac{P_{H3}}{n_{H3}}} = 105 * \sqrt[3]{\frac{7,5 * 0,92 * 0,98 * 0,98}{82}} = 45,40 \text{ mm}$$

Volím  $d_{H2} = 50 \text{ mm}$

## 3.5 Návrh modulu ozubení

### 3.5.1 Modul soukolí 1,2

$$m'_{n1,2} \geq f_p * \sqrt[3]{\frac{K_f * M_{KH1}}{\psi_M * Z_1 * \sigma_{FP}}} = 18 * \sqrt[3]{\frac{1,25 * 33,79}{18 * 26 * 420}} = 1,08 \text{ mm}$$

*Volím  $m_{n1,2} = 1,25 \text{ mm}$*

### 3.5.2 Modul soukolí 3,4

$$m'_{n3,4} \geq f_p * \sqrt[3]{\frac{K_f * M_{KH2}}{\psi_M * Z_3 * \sigma_{FP}}} = 18 * \sqrt[3]{\frac{1,25 * 191,06}{18 * 25 * 420}} = 1,95 \text{ mm}$$

*Volím  $m_{n3,4} = 2 \text{ mm}$*

## 3.6 Rozměry ozubených kol

Die KONTROLA OZUBENÍ ISO 6336 [3]:

$$\alpha_{t1,2} = 20,28^\circ$$

$$\alpha_{t3,4} = 20,18^\circ$$

$$\alpha_{w1,2} = 20,70^\circ$$

$$\alpha_{w3,4} = 21,05^\circ$$

### 3.6.1 Rozměry pastorku 1

$$d_1 = \frac{z_1 * m_{n1,2}}{\cos(\beta_{1,2})} = \frac{26 * 1,25}{\cos(10^\circ)} = 33,00 \text{ mm}$$

$$d_{w1} = \frac{d_1 * \cos(\alpha_{t1,2})}{\cos(\alpha_{w1,2})} = \frac{33,00 * \cos(20,28^\circ)}{\cos(20,70^\circ)} = 33,09 \text{ mm}$$

### 3.6.2 Rozměry kola 2

$$d_2 = \frac{z_2 * m_{n1,2}}{\cos(\beta_{1,2})} = \frac{150 * 1,25}{\cos(10^\circ)} = 190,39 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = \frac{d_2 * \cos(\alpha_{t1,2})}{\cos(\alpha_{w1,2})} = \frac{190,39 * \cos(20,28^\circ)}{\cos(20,70^\circ)} = 190,91 \text{ mm}$$

### 3.6.3 Rozměry pastorku 3

$$d_3 = \frac{z_3 * m_{n3,4}}{\cos(\beta_{3,4})} = \frac{26 * 2}{\cos(8^\circ)} = 50,49 \text{ mm}$$

$$d_{w3} = \frac{d_3 * \cos(\alpha_{t3,4})}{\cos(\alpha_{w3,4})} = \frac{50,49 * \cos(20,18^\circ)}{\cos(21,05^\circ)} = 50,78 \text{ mm}$$

### 3.6.4 Rozměry kola 4

$$d_4 = \frac{z_4 * m_{n3,4}}{\cos(\beta_{3,4})} = \frac{103 * 2}{\cos(8^\circ)} = 208,02 \text{ mm}$$

$$d_{w3} = \frac{d_3 * \cos(\alpha_{t3,4})}{\cos(\alpha_{w3,4})} = \frac{208,02 * \cos(20,18^\circ)}{\cos(21,05^\circ)} = 209,22 \text{ mm}$$

### 3.6.5 Osová vzdálenost 1,2

$$a_{1,2} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{33,0 + 190,39}{2} = 111,70 \text{ mm}$$

### 3.6.6 Osová vzdálenost 3,4

$$a_{3,4} = \frac{d_3 + d_4}{2} = \frac{50,49 + 208,02}{2} = 129,26 \text{ mm}$$

### 3.6.7 Požadovaná osová vzdálenost 1,2

*Volím valivou osovou vzdálenost  $a_{w1,2} = 112 \text{ mm}$*

### 3.6.8 Požadovaná osová vzdálenost 3,4

*Volím valivou osovou vzdálenost  $a_{w3,4} = 130 \text{ mm}$*

### 3.6.9 Korekce ozubení

Dle [3]:

$$\sum x_1 + x_2 = 0,245$$

$$\sum x_3 + x_4 = 0,379$$

#### 3.6.9.1 Korekce pastorku 1

*Volím korekci  $x_1 = +0,245$*

#### 3.6.9.2 Korekce kola 2

*Volím korekci  $x_2 = +0$*

#### 3.6.9.3 Korekce pastorku 3

*Volím korekci  $x_3 = +0,479$*

#### 3.6.9.4 Korekce kola 4

*Volím korekci  $x_4 = -0,1$*

### 3.6.10 Šířka ozubení pastorku 1

$$b_1 = \psi_M * m_{n1,2} + m_{n1,2} = 18 * 1,25 + 1,25 = 23,75 \cong 24 \text{ mm}$$

### 3.6.11 Šířka ozubení kola 2

$$b_2 = \psi_M * m_{n1,2} = 18 * 1,25 = 22,5 \text{ mm}$$

### 3.6.12 Šířka ozubení pastorku 3

$$b_1 = \psi_M * m_{n3,4} + m_{n3,4} = 18 * 2 + 2 = 38 \text{ mm}$$

### 3.6.13 Šířka ozubení kola 4

$$b_2 = \psi_M * m_{n1,2} = 18 * 2 = 36 \text{ mm}$$

## 3.7 **Návrh řemenového převodu**

### 3.7.1 Geometrický převod

$$i_g = i_{\text{REM}} * (1 - \xi) = 1,5 * (1 - 0,018) = 1,473$$

### 3.7.2 Návrh řemenu

Volím dle [1]: Řemen C

$$D_1 = 224 \text{ mm}$$

$$Pr = 8,23 \text{ kW}$$

$$c_\alpha = 0,95$$

$$c_p = 1,5$$

$$c_L = 0,83$$

$$c_z = 1$$

$$e = 25,5 \text{ mm}$$

$$f = 17 \text{ mm}$$

### 3.7.3 Průměr velké řemenice

$$i_g = \frac{D_2}{D_1} \Rightarrow D_2 = i_g * D_1 = 1,473 * 224 = 329,95 \cong 330 \text{ mm}$$

### 3.7.4 Délka řemene

Volím osovou vzdálenost  $a' = 300 \text{ mm}$

$$L' = \frac{\pi}{2} * (D_1 + D_2) + 2 * a' + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4 * a'} = \frac{\pi}{2} * (224 + 330) + 2 * 300 + \frac{(330 - 224)^2}{4 * 300} = 1 479,6 \text{ mm}$$

Volím  $L = 1 600 \text{ mm}$

### 3.7.5 Skutečná osová vzdálenost

$$\cos\left(\frac{\alpha'}{2}\right) = \frac{D_2 - D_1}{2 * a'} \Rightarrow \frac{\alpha'}{2} = \arccos\left(\frac{D_2 - D_1}{2 * a'}\right) = \arccos\left(\frac{330 - 224}{2 * 300}\right) = 79,82^\circ$$

$$\delta' = 90 - \frac{\alpha'}{2} = 90 - 79,82^\circ = 10,18^\circ$$

$$a = \frac{1,004 * L - 0,5 * \pi * (D_1 + D_2) - \frac{\pi * \delta'}{180} * (D_2 - D_1)}{2 * \sin\left(\frac{\alpha'}{2}\right)}$$
$$= \frac{1,004 * 1 600 - 0,5 * \pi * (224 + 330) - \frac{\pi * 10,18^\circ}{180} * (330 - 224)}{2 * \sin 79,82^\circ} = 383,53 \text{ mm}$$

Volím osovou vzdálenost  $a = 380 \text{ mm}$  -> napnutí řemene pomocí napínáku řemene TERE 5

### 3.7.6 Počet řemenů řemenového převodu

$$z \geq \frac{P_M}{P_S * c_z} = \frac{P_M}{P_r * \frac{c_\alpha * c_L}{c_p} * c_z} = \frac{7,5}{8,23 * \frac{0,95 * 0,83}{1,5} * 1} = 1,7$$

Volím  $z = 2$

### 3.7.7 Šířka řemenice

$$B = (z - 1) * e + 2 * f = (2 - 1) * 25,5 + 2 * 17 = 59,5 \cong 60 \text{ mm}$$

### 3.7.8 Obvodové rychlosti

$$v_1 = \frac{\pi * D_1 * n_M}{60} = \frac{\pi * 224 * 2 925}{60} = 34,31 \text{ m s}^{-1}$$

$$v_2 = \frac{\pi * D_2 * n_{H1}}{60} = \frac{\pi * 330 * 1 950}{60} = 33,69 \text{ m s}^{-1}$$

### 3.7.9 Síly v řemenovém převodu

$$F = \frac{1\,000 * P_m}{v_1} = \frac{1\,000 * 7,5}{34,10} = 219\,N$$

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{D_2 - D_1}{2 * a} \Rightarrow \frac{\alpha}{2} = \arccos\left(\frac{D_2 - D_1}{2 * a}\right) = \arccos\left(\frac{330 - 224}{2 * 380}\right) = 81,98^\circ$$

$$\delta = 90 - \frac{\alpha}{2} = 90 - 81,98^\circ = 8,02^\circ$$

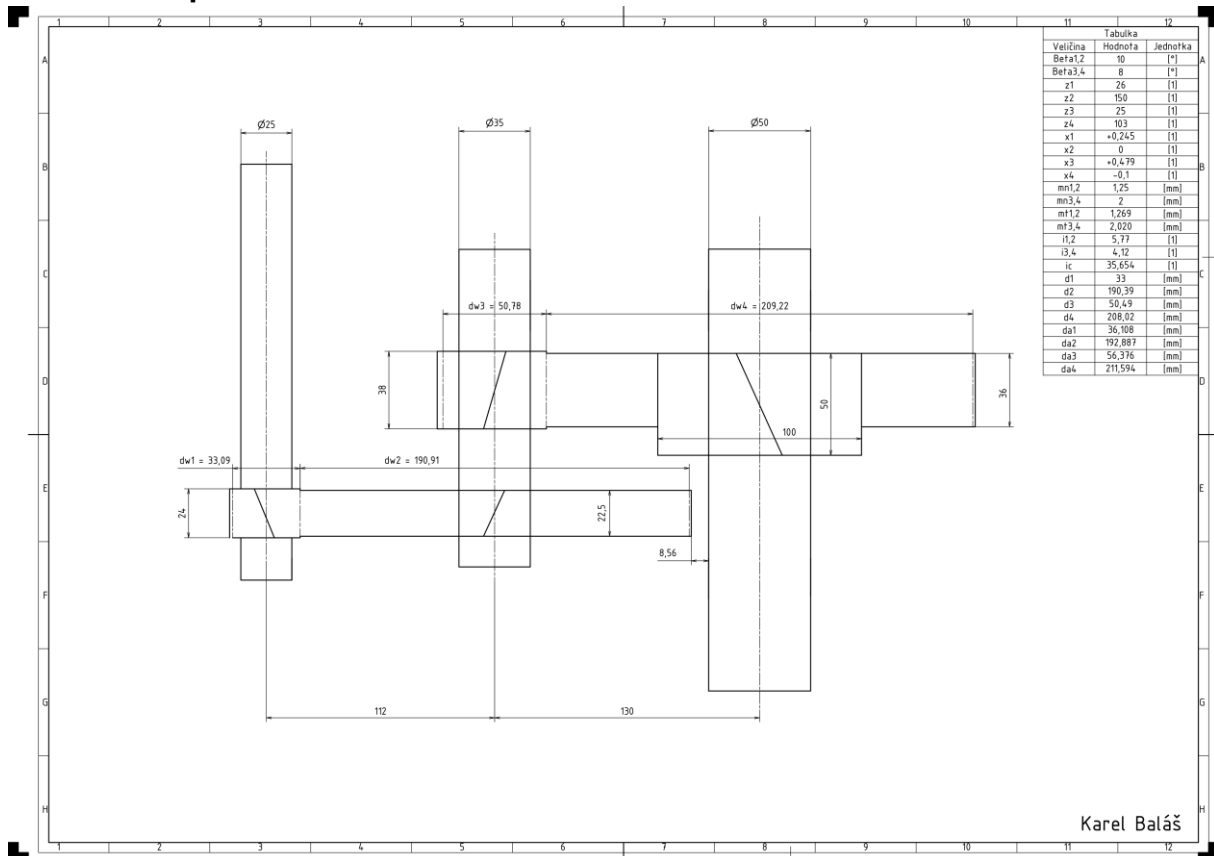
$$V = 2 * Q_0 * \cos \delta = 2 * 0,54 * F * \cos \delta = 2 * 0,54 * 219 * \cos 8,02^\circ = 238\,N$$

$$\begin{aligned} \tan \vartheta &= \frac{F}{2 * Q_0} * \tan \delta = \frac{F}{2 * 0,54 * F} * \tan \delta \Rightarrow \vartheta \\ &= \operatorname{atan}\left(\frac{F}{2 * 0,54 * F} * \tan \delta\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{219}{2 * 0,54 * 219} * \tan 8,02^\circ\right) = 7,43^\circ \end{aligned}$$

$$V_x = V * \cos(\gamma - \vartheta) = 238 * \cos(0^\circ - 7,43^\circ) = 236\,N$$

$$V_y = V * \sin(\gamma - \vartheta) = 238 * \sin(0^\circ - 7,43^\circ) = -31\,N$$

### 3.8 Konceptní návrh 1



## 4 Kontrolní výpočty

### 4.1 Kontrola ozubení 1,2

Kontrola ozubení dle ISO 6336			jednotky mm, Nmm, °, kW, Mpa, m.s <sup>-1</sup>					
			Roz.	kolo 1	kolo 2		kolo 1	kolo 2
$z_1$	26		d	33,00136	190,3925	$\sigma_{Flim}$	700	700
$z_2$	150		$d_a$	36,10789	192,8865	$\sigma_{Hlim}$	1270	1270
$m_n$	1,25		$d_f$	30,48886	187,2675	$Y_{Fa}$	2,32342	2,144125
$x_1$	0,245		$d_b$	30,9549	178,586	$Y_{sa}$	1,720216	1,842837
$x_2$	0		$d_w$	33,09097	190,9094	$Y_\epsilon$	0,694019	0,694019
$\alpha_n$	20		$h_a$	1,553263	1,247013	$Y_\beta$	0,922089	0,922089
$\beta$	10		$h_f$	1,25625	1,5625	$F_\beta$	6	6
$a_w$	112,0002		h	2,809513	2,809513	$Y_{N.x}$	1	1
$b_1$	23,75		$s_n$	2,186427	1,963495	$Z_H$	2,436271	2,436271
$b_2$	22,5		$s_t$	2,220156	1,993785	$Z_E$	189,8	189,8
P	7,5		$v_n$	1,740564	1,963495	$Z_\epsilon$	0,787237	0,787237
$n_1$	1938		$v_t$	1,767415	1,993785	$Z_\beta$	0,992375	0,992375
$M_{k1}$	36955,48		$\alpha_w$	20,69899		$Z_B$	1	1
v	3,348762					$Z_{R.T}$	1,5	1,5
u	5,769231					$K_A$	1,1	1,1
						$K_V$	1,11167	1,11167
Kontrolní rozměry						$K_{F\alpha}$	1,1	1,1
	1	2				$K_{F\beta}$	1,190501	1,189015
$h_k$	1,201911	0,931486				$K_{H\alpha}$	1,1	1,1
$s_k$	1,930664	1,930664		konst. tloušťka		$K_{H\beta}$	1,218283	1,218283
$z'$	4	18						
M/z	13,60058	67,32122		přes zuby				
d	1,845082	1,845082				$S_F$	2,265418	2,173619
M/d	35,35894	192,1652		přes kuličky		$S_H$	2,189753	2,189753

## 4.2 Kontrola ozubení 3,4

Kontrola ozubení dle ISO 6336				jednotky mm, Nmm, °, kW, Mpa, m.s <sup>-1</sup>				
			Roz.	kolo 3	kolo 4		kolo 3	kolo 4
z <sub>3</sub>	25		d	50,49138	208,0245	σ <sub>Flim</sub>	700	700
z <sub>4</sub>	103		d <sub>a</sub>	56,37641	211,5935	σ <sub>Hlim</sub>	1270	1270
m <sub>n</sub>	2		d <sub>f</sub>	47,40738	202,6245	Y <sub>Fa</sub>	2,140757	2,208342
x <sub>1</sub>	0,479		d <sub>b</sub>	47,39166	195,2536	Y <sub>sa</sub>	1,818921	1,774717
x <sub>2</sub>	-0,1		d <sub>w</sub>	50,78142	209,2195	Y <sub>ε</sub>	0,720355	0,720355
α <sub>n</sub>	20		h <sub>a</sub>	2,942517	1,784517	Y <sub>β</sub>	0,950046	0,950046
β	8		h <sub>f</sub>	1,542	2,7	F <sub>β</sub>	6	6
a <sub>w</sub>	130,0004		h	4,484517	4,484517	Y <sub>N,x</sub>	1	1
b <sub>3</sub>	38		s <sub>n</sub>	3,83896	2,996005	Z <sub>H</sub>	2,418063	2,418063
b <sub>4</sub>	36		s <sub>t</sub>	3,876687	3,025448	Z <sub>E</sub>	189,8	189,8
P	7,5		v <sub>n</sub>	2,444226	3,287181	Z <sub>ε</sub>	0,825461	0,825461
n <sub>3</sub>	366,5		v <sub>t</sub>	2,468247	3,319486	Z <sub>β</sub>	0,995122	0,995122
M <sub>k3</sub>	195415,3		α <sub>w</sub>	21,05259		Z <sub>B</sub>	1	1
v	0,968924					Z <sub>R,T</sub>	1,5	1,5
u	4,12					K <sub>A</sub>	1,1	1,1
						K <sub>V</sub>	1,015285	1,015285
Kontrolní rozměry						K <sub>Fα</sub>	1,1	1,1
	1	2				K <sub>Fβ</sub>	1,20417	1,202573
h <sub>k</sub>	2,325608	1,303068				K <sub>Hα</sub>	1,1	1,1
s <sub>k</sub>	3,389887	3,389887		konst. tloušťka		K <sub>Hβ</sub>	1,234053	1,234053
z'	3	12						
M/z	16,13608	70,72906		přes zuby				
d	2,952131	2,952131				S <sub>F</sub>	1,743439	1,64319
M/d	55,00008	210,4984		přes kuličky		S <sub>H</sub>	1,783989	1,783989



## 4.3 Síly v ozubení

### 4.3.1 Tečné síly

#### 4.3.1.1 Tečná síla pastorku 1

$$F_{t21} = \frac{2 * M_{kH1} * 1000}{d_{w1}} = \frac{2 * 33,79 * 1\,000}{30,09} = 2\,042\,N$$

#### 4.3.1.2 Tečná síla kola 2

$$F_{t12} = \frac{2 * M_{kH2} * 1000}{d_{w2}} = \frac{2 * 191,06 * 1\,000}{190,91} = 2\,002\,N$$

#### 4.3.1.3 Tečná síla pastorku 3

$$F_{t43} = \frac{2 * M_{kH2} * 1000}{d_{w3}} = \frac{2 * 191,06 * 1\,000}{50,78} = 7\,525\,N$$

#### 4.3.1.4 Tečná síla kola 4

$$F_{t34} = \frac{2 * M_{kH3} * 1000}{d_{w4}} = \frac{2 * 771,41 * 1\,000}{209,22} = 7\,374\,N$$

### 4.3.2 Radiální síly

#### 4.3.2.1 Radiální síla pastorku 1

$$F_{r21} = \frac{F_{t21} * \tan \alpha}{\cos \beta_{1,2}} = \frac{2\,042 * \tan 20^\circ}{\cos 10^\circ} = 755\,N$$

#### 4.3.2.2 Radiální síla kola 2

$$F_{r12} = \frac{F_{t12} * \tan \alpha}{\cos \beta_{1,2}} = \frac{2\,002 * \tan 20^\circ}{\cos 10^\circ} = 740\,N$$

#### 4.3.2.3 Radiální síla pastorku 3

$$F_{r43} = \frac{F_{t43} * \tan \alpha}{\cos \beta_{3,4}} = \frac{7\,525 * \tan 20^\circ}{\cos 8^\circ} = 2\,766\,N$$

#### 4.3.2.4 Radiální síla kola 4

$$F_{r34} = \frac{F_{t34} * \tan \alpha}{\cos \beta_{3,4}} = \frac{7\,374 * \tan 20^\circ}{\cos 8^\circ} = 2\,710\,N$$

### 4.3.3 Axiální síly

#### 4.3.3.1 Axiální síla pastorku 1

$$F_{a21} = F_{t21} * \tan \beta_{1,2} = 2\,042 * \tan 10^\circ = 360\,N$$

#### 4.3.3.2 Axiální síla kola 2

$$F_{a12} = F_{t12} * \tan \beta_{1,2} = 2\,002 * \tan 10^\circ = 353\,N$$

#### 4.3.3.3 Axiální síla pastorku 3

$$F_{a43} = F_{t43} * \tan \beta_{3,4} = 7\,525 * \tan 8^\circ = 1\,058\,N$$

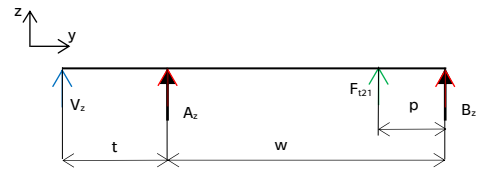
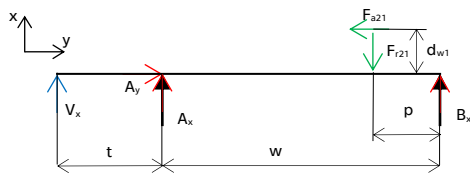
#### 4.3.3.4 Axiální síla kola 4

$$F_{a34} = F_{t34} * \tan \beta_{3,4} = 7\,374 * \tan 8^\circ = 1\,036\,N$$

## 4.4 Reakce v ložiskách

Návrh:  $w = 131 \text{ mm}$   
 $p = 32,5 \text{ mm}$   
 $t = 74 \text{ mm}$

### 4.4.1 Vstupní hřídel – normální chod



$$x: V_x + A_x + B_x - F_{r21} = 0$$

$$y: A_y - F_{a21} = 0$$

$$M_A: V_x * t + F_{r21} * (w - p) - B_x * w - F_{a21} * \frac{d_{w1}}{2} = 0$$

$$B_x = \frac{V_x * t + F_{r21} * (w - p) - F_{a21} * \frac{d_{w1}}{2}}{w}$$

$$= \frac{236 * 74 + 755 * (131 - 32,5) - 360 * \frac{33,09}{2}}{131}$$

$$= 655 \text{ N}$$

$$A_y = F_{a21} = 360 \text{ N}$$

$$A_x = F_{r21} - B_x - V_x = 755 - 655 - 236 = -136 \text{ N}$$

$$z: V_z + A_z + B_z + F_{t21} = 0$$

$$y: 0$$

$$M_A: V_z * t - F_{t21} * (w - p) - B_z * w = 0$$

$$B_z = \frac{V_z * t - F_{t21} * (w - p)}{w}$$

$$= \frac{-31 * 74 - 2042 * (126 - 32,5)}{131}$$

$$= -1553 \text{ N}$$

$$A_z = -F_{t21} - B_z - V_z$$

$$= -2042 - (-1553)$$

$$- (-31) = -459 \text{ N}$$

### Radiální reakce v ložisku A – normální chod

$$R_{Ar} = \sqrt{A_x^2 + A_z^2} = \sqrt{(-136)^2 + (-459)^2} = 478 \text{ N}$$

### Axiální reakce v ložisku A – normální chod

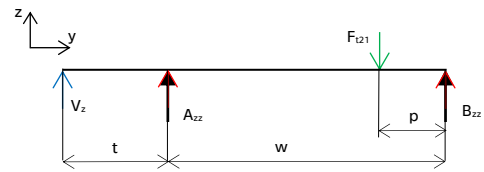
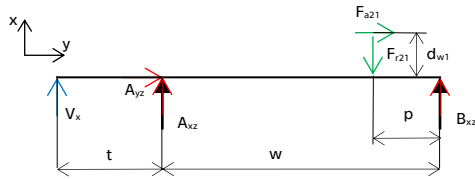
$$R_{Aa} = A_y = 360 \text{ N}$$

### Radiální reakce v ložisku B – normální chod

$$R_{Br} = \sqrt{B_x^2 + B_z^2} = \sqrt{655^2 + (-1553)^2} = 1518 \text{ N}$$

#### 4.4.2 Vstupní hřídel – zpětný chod

Návrh:  $w = 131 \text{ mm}$   
 $p = 32,5 \text{ mm}$   
 $t = 74 \text{ mm}$



$$x: V_x + A_{xz} + B_{xz} - F_{r21} = 0$$

$$y: A_{yz} + F_{a21} = 0$$

$$M_A: V_x * t + F_{r21} * (w - p) - B_{xz} * w + F_{a21} * \frac{d_{w1}}{2} = 0$$

$$B_{xz} = \frac{V_x * t + F_{r21} * (w - p) + F_{a21} * \frac{d_{w1}}{2}}{w}$$

$$= \frac{236 * 74 + 755 * (131 - 32,5) + 360 * \frac{33,09}{2}}{131}$$

$$= 746 \text{ N}$$

$$A_{yz} = -F_{a21} = -360 \text{ N}$$

$$A_{xz} = F_{r21} - B_{xz} - V_x = 755 - 748 - 236 = -228 \text{ N}$$

$$z: V_z + A_{zz} + B_{zz} - F_{t21} = 0$$

$$y: 0$$

$$M_A: V_z * t - F_{t21} * (w - p) - B_{zz} * w = 0$$

$$B_{zz} = \frac{V_z * t + F_{t21} * (w - p)}{w}$$

$$= \frac{-31 * 74 + 2042 * (131 - 32,5)}{131} = 1518 \text{ N}$$

$$A_{zz} = F_{t21} - B_{zz} - V_z$$

$$= 2042 - 1518 - (-31)$$

$$= 555 \text{ N}$$

#### Radiální reakce v ložisku A – zpětný chod

$$R_{Arz} = \sqrt{A_{xz}^2 + A_{zz}^2} = \sqrt{(-228)^2 + 555^2} = 600 \text{ N}$$

#### Axiální reakce v ložisku A – zpětný chod

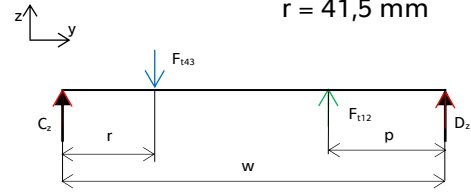
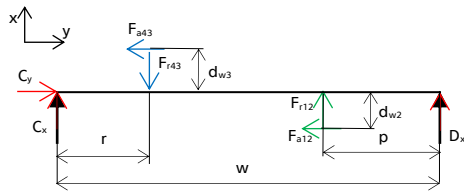
$$R_{Aaz} = |A_y| = 360 \text{ N}$$

#### Radiální reakce v ložisku B – zpětný chod

$$R_{Brz} = \sqrt{B_{xz}^2 + B_{zz}^2} = \sqrt{746^2 + 1518^2} = 1692 \text{ N}$$

#### 4.4.3 Předloková hřídel – normální chod

Návrh:  $w = 130 \text{ mm}$   
 $p = 33,75 \text{ mm}$   
 $r = 41,5 \text{ mm}$



$$x: C_x + D_x + F_{r12} - F_{r43} = 0$$

$$y: C_y - F_{a12} - F_{a43} = 0$$

$$M_C: F_{r43} * r - F_{r12} * (w - p) - D_x * w + F_{a12} * \frac{d_{w2}}{2} - F_{a43} * \frac{d_{w3}}{2} = 0$$

$$D_x = \frac{F_{r43} * r + F_{r12} * (w - p) + F_{a12} * \frac{d_{w2}}{2} - F_{a43} * \frac{d_{w3}}{2}}{w}$$

$$= \frac{2\,766 * 41,5 + 740 * (130 - 33,75) + 353 * \frac{190,91}{2} - 1\,058 * \frac{50,78}{2}}{130}$$

$$= -130 \text{ N}$$

$$C_y = F_{a12} + F_{a43} = 353 + 1\,058 = 1\,411 \text{ N}$$

$$C_x = F_{r43} - F_{r12} - D_x = 2\,766 - 740 - (-130) = 2\,156 \text{ N}$$

$$z: C_z + D_z - F_{t43} + F_{t12} = 0$$

$$y: 0$$

$$M_C: F_{t43} * r - F_{t12} * (w - p) - D_z * w = 0$$

$$D_z = \frac{F_{t43} * r - F_{t12} * (w - p)}{w}$$

$$= \frac{7\,525 * 41,5 - 2\,002 * (130 - 33,75)}{130}$$

$$= 920 \text{ N}$$

$$C_z = F_{t43} - F_{t12} - D_z$$

$$= 7\,525 - 2\,002 - 920$$

$$= 4\,603$$

#### Radiální reakce v ložisku C – normální chod

$$R_{Cr} = \sqrt{C_x^2 + C_z^2} = \sqrt{2\,156^2 + 4\,603^2} = 5\,083 \text{ N}$$

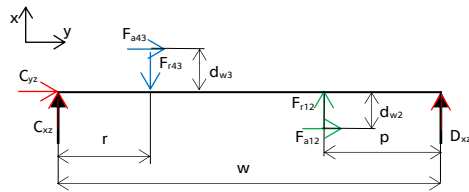
#### Axiální reakce v ložisku C – normální chod

$$R_{Ca} = C_y = 1\,411 \text{ N}$$

#### Radiální reakce v ložisku D – normální chod

$$R_{Dr} = \sqrt{D_x^2 + D_z^2} = \sqrt{(-130)^2 + 920^2} = 929 \text{ N}$$

#### 4.4.4 Předloková hřídel – zpětný chod



$$x: C_{xz} + D_{xz} + F_{r12} - F_{r43} = 0$$

$$y: C_{yz} + F_{a12} + F_{a43} = 0$$

$$M_C: F_{r43} * r - F_{r12} * (w - p) - D_{xz} * w - F_{a12} * \frac{d_{w2}}{2} + F_{a43} * \frac{d_{w3}}{2} = 0$$

$$D_{xz} = \frac{F_{r43} * r + F_{r12} * (w - p) - F_{a12} * \frac{d_{w2}}{2} + F_{a43} * \frac{d_{w3}}{2}}{w}$$

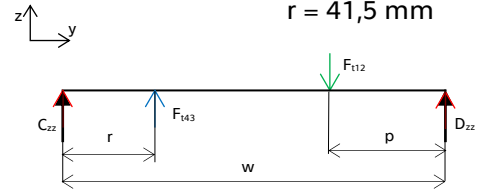
$$= \frac{2\,766 * 41,5 + 740 * (130 - 33,75) - 353 * \frac{190,91}{2} + 1\,058 * \frac{50,78}{2}}{130}$$

$$= 801 \text{ N}$$

$$C_{yz} = -F_{a12} - F_{a43} = -353 - 1\,058 = -1\,411 \text{ N}$$

$$C_{xz} = F_{r43} - F_{r12} - D_{xz} = 2\,766 - 740 - 801 = 1\,225 \text{ N}$$

Návrh:  $w = 130 \text{ mm}$   
 $p = 33,75 \text{ mm}$   
 $r = 41,5 \text{ mm}$



$$z: C_{zz} + D_{zz} + F_{t43} - F_{t12} = 0$$

$$y: 0$$

$$M_C: -F_{t43} * r + F_{t12} * (w - p) - D_{zz} * w = 0$$

$$D_{zz} = \frac{-F_{t43} * r + F_{t12} * (w - p)}{w}$$

$$= \frac{-7\,525 * 41,5 + 2\,002 * (130 - 33,75)}{130}$$

$$= -920 \text{ N}$$

$$C_{zz} = -F_{t43} + F_{t12} - D_{zz}$$

$$= -7\,525 + 2\,002 - (-920) = -4\,603$$

#### Radiální reakce v ložisku C – zpětný chod

$$R_{Crz} = \sqrt{C_{xz}^2 + C_{zz}^2} = \sqrt{1\,225^2 + (-4\,603)^2} = 4\,763 \text{ N}$$

#### Axiální reakce v ložisku C – zpětný chod

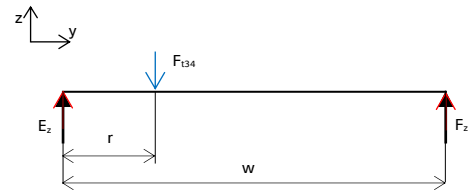
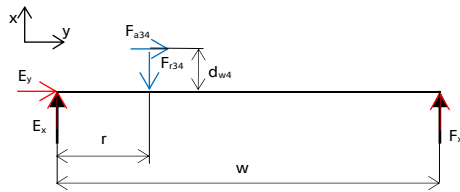
$$R_{Caz} = |C_{yz}| = 1\,411 \text{ N}$$

#### Radiální reakce v ložisku D – zpětný chod

$$R_{Drz} = \sqrt{D_{xz}^2 + D_{zz}^2} = \sqrt{801^2 + (-920)^2} = 1\,220 \text{ N}$$

#### 4.4.5 Výstupní hřídel – normální chod

Návrh:  $w = 125 \text{ mm}$   
 $r = 38 \text{ mm}$



$$x: E_x + F_x - F_{r34} = 0$$

$$y: E_y + F_{a34} = 0$$

$$M_E: F_{r34} * r - E_x * w + F_{a34} * \frac{d_{w4}}{2} = 0$$

$$F_x = \frac{F_{r34} * r + F_{a34} * \frac{d_{w4}}{2}}{w} = \frac{2710 * 38 + 1036 * \frac{209,22}{2}}{125} = 1691 \text{ N}$$

$$E_y = -F_{a34} = -1036 \text{ N}$$

$$E_x = F_{r34} - F_x = 2710 - 1691 = 1019 \text{ N}$$

$$z: E_z + F_z - F_{t34} = 0$$

$$y: 0$$

$$M_E: F_{t34} * r - F_z * w = 0$$

$$F_z = \frac{F_{t34} * r}{w} = \frac{1036 * 38}{130} = 2242 \text{ N}$$

$$E_z = F_{t34} - F_z = 7374 - 2242 = 5132 \text{ N}$$

#### Radiální reakce v ložisku E – normální chod

$$R_{Er} = \sqrt{E_x^2 + E_z^2} = \sqrt{1019^2 + 5132^2} = 5233 \text{ N}$$

#### Axiální reakce v ložisku E – normální chod

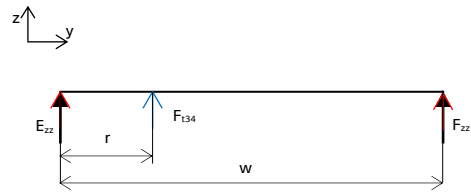
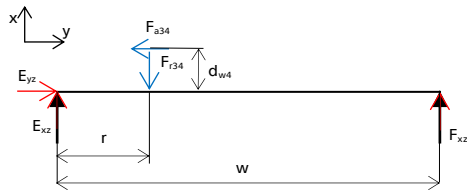
$$R_{Ea} = |E_y| = 1036 \text{ N}$$

#### Radiální reakce v ložisku F – normální chod

$$R_{Fr} = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} = \sqrt{1691^2 + 2242^2} = 2808 \text{ N}$$

#### 4.4.6 Výstupní hřídel – zpětný chod

Návrh:  $w = 125 \text{ mm}$   
 $r = 38 \text{ mm}$



$$x: E_{xz} + F_{xz} - F_{r34} = 0$$

$$y: E_{yz} - F_{a34} = 0$$

$$M_E: F_{r34} * r - E_{xz} * w - F_{a34} * \frac{d_{w4}}{2} = 0$$

$$F_{xz} = \frac{F_{r34} * r - F_{a34} * \frac{d_{w4}}{2}}{w} = \frac{2710 * 38 - 1036 * \frac{209,22}{2}}{125} = -43 \text{ N}$$

$$E_{yz} = F_{a34} = 1036 \text{ N}$$

$$E_{xz} = F_{r34} - F_{xz} = 2710 - (-43) = 2754 \text{ N}$$

$$z: E_{zz} + F_{zz} + F_{t34} = 0$$

$$y: 0$$

$$M_E: -F_{t34} * r - F_{zz} * w = 0$$

$$F_{zz} = \frac{-F_{t34} * r}{w} = \frac{-1036 * 38}{125} = -2242 \text{ N}$$

$$E_{zz} = -F_{t34} - F_{zz} = -7374 - (-2242) = -5132 \text{ N}$$

#### Radiální reakce v ložisku E – zpětný chod

$$R_{Erz} = \sqrt{E_{xz}^2 + E_{zz}^2} = \sqrt{2754^2 + (-5132)^2} = 5824 \text{ N}$$

#### Axiální reakce v ložisku E – zpětný chod

$$R_{Ea} = E_{yz} = 1036 \text{ N}$$

#### Radiální reakce v ložisku F – zpětný chod

$$R_{Frr} = \sqrt{F_{xz}^2 + F_{zz}^2} = \sqrt{(-43)^2 + (-2242)^2} = 2242 \text{ N}$$

## 4.5 Návrh ložisek

### 4.5.1 Vstupní hřídel

Volím kuličkové ložisko 6405

Dle [4]:

$$d = 25 \text{ mm}$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$B = 21 \text{ mm}$$

$$C_0 = 19\,300 \text{ N}$$

$$C = 35\,800 \text{ N}$$

$$f_0 = 12$$

#### 4.5.1.1 Ložisko A

Maximální síly v ložisku A:

$$\text{Radiální síla } F_r = R_{Arz} = 600 \text{ N}$$

$$\text{Axiální síla } F_a = R_{Aaz} = 360 \text{ N}$$

$$e = \frac{F_a}{F_r} = \frac{360}{600} = 0,60$$

$$\frac{f_0 * F_a}{C_0} = \frac{12 * 360}{19\,300} = 0,224$$

$$\text{Pro } \frac{f_0 * F_a}{C_0} = 0,224 \rightarrow e = 0,20 \Rightarrow 0,2 < 0,52 \quad \rightarrow \quad X = 0,56$$

$$Y = 2$$

$$F_{ekt} = 1 * X * F_r + Y * F_a = 1 * 0,56 * 600 + 2 * 360 = 1\,056 \text{ N}$$

$$L_{10H} = \left( \frac{C}{F_{ekt}} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * n_{H1}} = \left( \frac{35\,800}{1\,056} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * 1\,950} = 332\,881 \text{ hodin} > 25\,000 \text{ hodin}$$

Minimální zatížení

$$P_{min} = 0,01 * C_0 > F_{ekt} \Rightarrow 0,01 * 19\,300 = 193 \text{ N} > 1\,056 \text{ N}$$

**LOŽISKO VYHOVUJE**

#### 4.5.1.2 Ložisko B

Maximální síla v ložisku B:

$$\text{Radiální síla } F_r = R_{Brz} = 1\,692 \text{ N}$$

Pouze radiální zatížení  $\rightarrow X = 1$

$$F_{ekt} = 1,2 * X * F_r = 1,2 * 1 * 1\,692 = 2\,030 \text{ N}$$

$$L_{10H} = \left( \frac{C}{F_{ekt}} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * n_{H1}} = \left( \frac{35\,800}{2\,030} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * 1\,950} = 46\,863 \text{ hodin} > 25\,000 \text{ hodin}$$

Minimální zatížení

$$P_{min} = 0,01 * C_0 > F_{ekt} \Rightarrow 0,01 * 19\,300 = 193 \text{ N} > 2\,030 \text{ N}$$

**LOŽISKO VYHOVUJE**



#### 4.5.2 Předloková hřídel

##### Volím kuličkové ložisko 6407

Dle [4]:

$$d = 35 \text{ mm}$$

$$D = 100 \text{ mm}$$

$$B = 25 \text{ mm}$$

$$C_0 = 31\,000 \text{ N}$$

$$C = 55\,300 \text{ N}$$

$$f_0 = 12$$

##### 4.5.2.1 Ložisko C

Maximální síly v ložisku C:

$$\text{Radiální síla } F_r = R_{Cr} = 5\,083 \text{ N}$$

$$\text{Axiální síla } F_a = R_{Ca} = 1\,411 \text{ N}$$

$$e = \frac{F_a}{F_r} = \frac{5\,083}{1\,411} = 0,28$$

$$\frac{f_0 * F_a}{C_0} = \frac{12 * 1\,411}{31\,000} = 0,546$$

$$\text{Pro } \frac{f_0 * F_a}{C_0} = 0,546 \rightarrow e = 0,25 \Rightarrow 0,25 < 0,28 \quad \rightarrow \quad X = 0,56$$

$$Y = 1,85$$

$$F_{ekt} = 1 * X * F_r + Y * F_a = 1 * 0,56 * 5\,083 + 1,85 * 1\,411 = 5\,456 \text{ N}$$

$$L_{10H} = \left( \frac{C}{F_{ekt}} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * n_{H2}} = \left( \frac{55\,300}{5\,456} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * 338} = 51\,348 \text{ hodin} > 25\,000 \text{ hodin}$$

Minimální zatížení

$$P_{min} = 0,01 * C_0 > F_{ekt} \Rightarrow 0,01 * 31\,000 = 310 \text{ N} > 5\,456 \text{ N}$$

**LOŽISKO VYHOVUJE**

##### 4.5.2.2 Ložisko D

Maximální síla v ložisku D:

$$\text{Radiální síla } F_r = R_{Drz} = 1\,220 \text{ N}$$

Pouze radiální zatížení -> X = 1

$$F_{ekt} = 1,2 * X * F_r = 1,2 * 1 * 1\,220 = 1\,464 \text{ N}$$

$$L_{10H} = \left( \frac{C}{F_{ekt}} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * n_{H2}} = \left( \frac{55\,300}{1\,464} \right)^3 * \frac{10^6}{60 * 338} = 2\,658\,180 \text{ hodin} > 25\,000 \text{ hodin}$$

Minimální zatížení

$$P_{min} = 0,01 * C_0 > F_{ekt} \Rightarrow 0,01 * 31\,000 = 310 \text{ N} > 1\,920 \text{ N}$$

**LOŽISKO VYHOVUJE**

#### 4.5.3 Výstupní hřídel

##### Volím kuličkové ložisko 6210

Dle [4]:

d = 50 mm  
D = 90 mm  
B = 20 mm  
C<sub>0</sub> = 23 200 N  
C = 37 100 N  
f<sub>0</sub> = 14

##### 4.5.3.1 Ložisko E

Maximální síly v ložisku E:

Radiální síla F<sub>r</sub> = R<sub>Erz</sub> = 5 824 N

Axiální síla F<sub>a</sub> = R<sub>Eaz</sub> = 1 036 N

$$e = \frac{F_a}{F_r} = \frac{1\,036}{5\,824} = 0,18$$

$$\frac{f_0 * F_a}{C_0} = \frac{14 * 1\,036}{23\,200} = 0,625$$

Pro  $\frac{f_0 * F_a}{C_0} = 0,625 \rightarrow e = 0,26 \Rightarrow 0,26 > 0,18 \rightarrow X = 1$

Y = 0

$$F_{ekt} = 1 * X * F_r + Y * F_a = 1 * 1 * 5\,824 + 0 * 1\,036 = 5\,824 \text{ N}$$

$$L_{10H} = \left(\frac{C}{F_{ekt}}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * n_{H3}} = \left(\frac{37\,100}{5\,824}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * 82} = 52\,502 \text{ hodin} > 25\,000 \text{ hodin}$$

Minimální zatížení

$$P_{min} = 0,01 * C_0 > F_{ekt} \Rightarrow 0,01 * 23\,200 = 232 \text{ N} > 5\,824 \text{ N}$$

**LOŽISKO VYHOVUJE**

##### 4.5.3.2 Ložisko F

Maximální síly v ložisku F:

Radiální síla F<sub>r</sub> = R<sub>Fr</sub> = 2 808 N

Pouze radiální zatížení -> X = 1

$$F_{ekt} = 1,2 * X * F_r = 1,2 * 1 * 2\,808 = 3\,370 \text{ N}$$

$$L_{10H} = \left(\frac{C}{F_{ekt}}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * n_{H3}} = \left(\frac{37\,100}{3\,370}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * 82} = 936\,470 \text{ hodin} > 25\,000 \text{ hodin}$$

Minimální zatížení

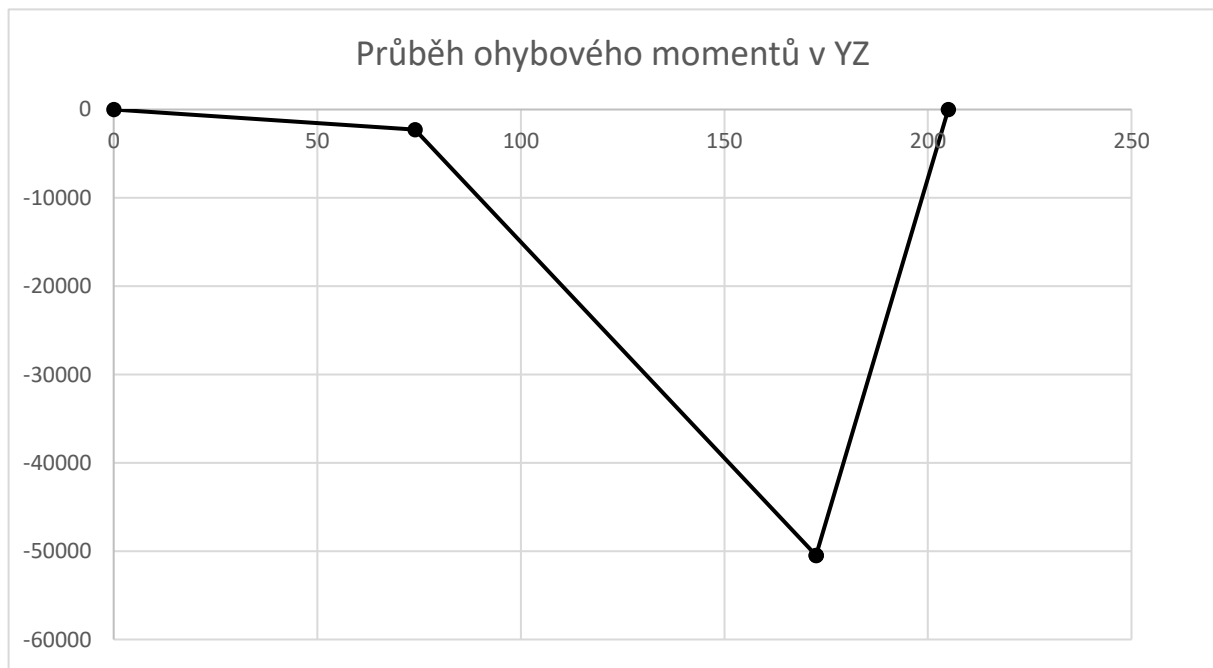
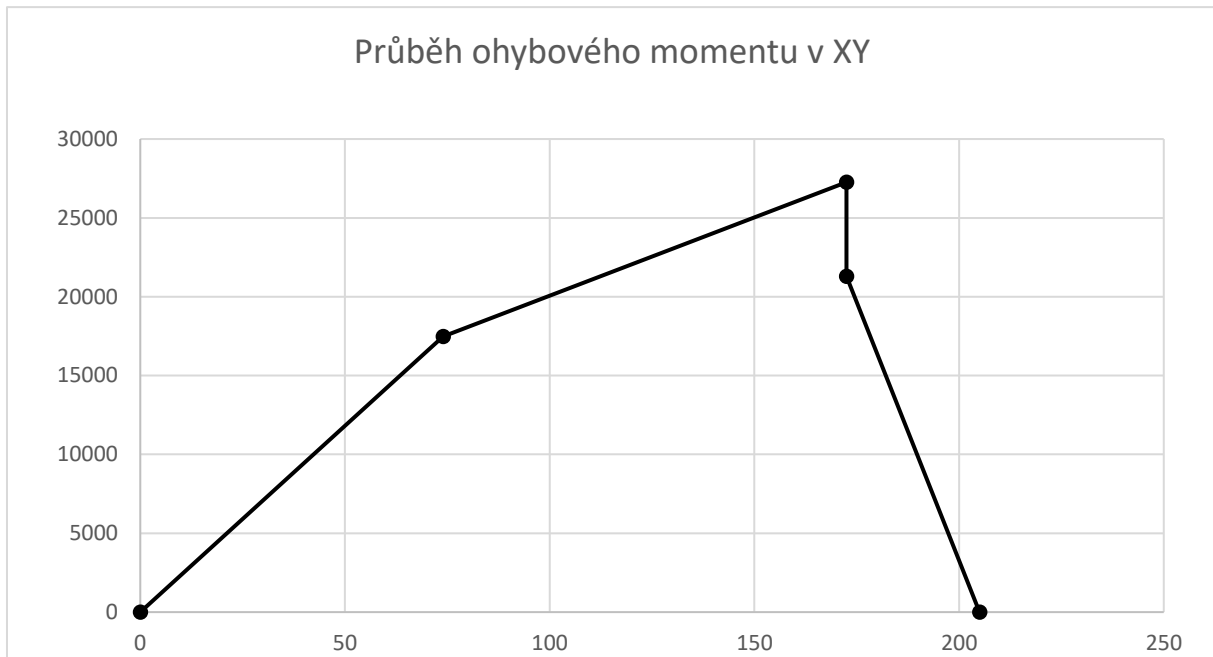
$$P_{min} = 0,01 * C_0 > F_{ekt} \Rightarrow 0,01 * 23\,200 = 232 \text{ N} > 3\,370 \text{ N}$$

**LOŽISKO VYHOVUJE**

## 4.6 Statická kontrola hřídelů

### 4.6.1 Vstupní hřídel

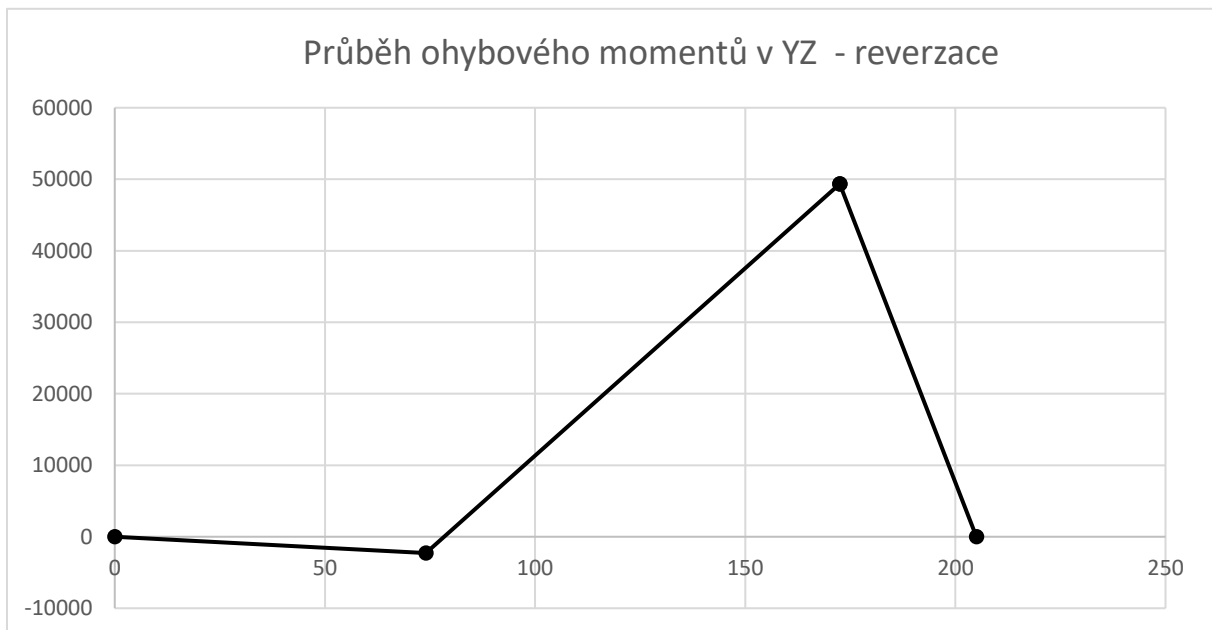
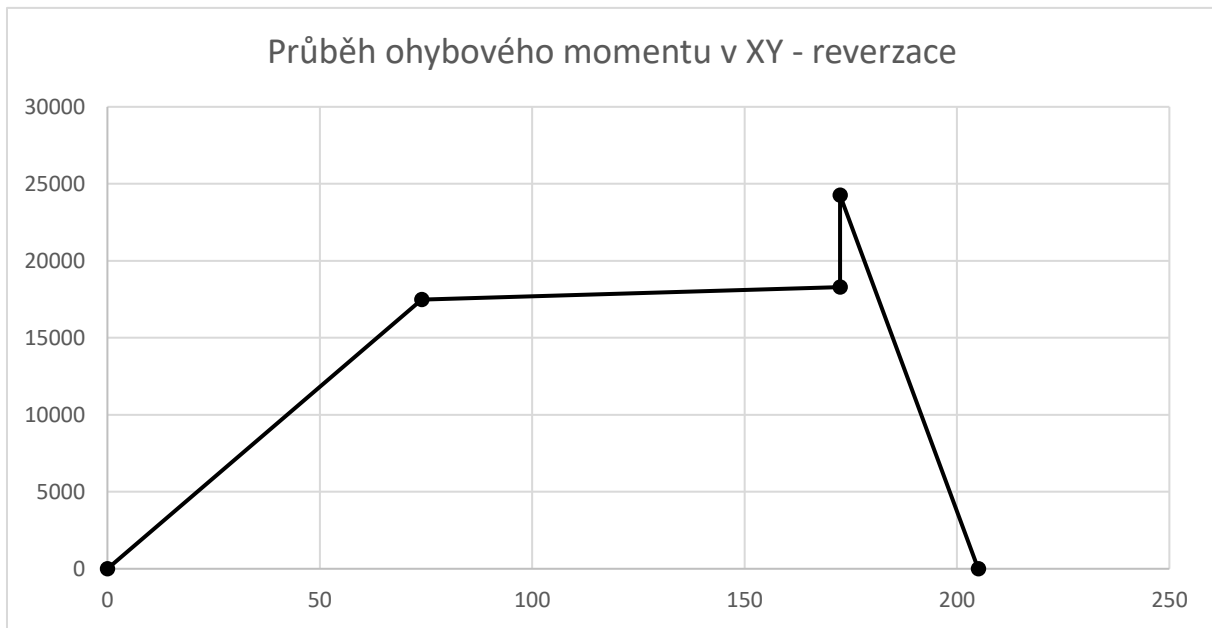
#### 4.6.1.1 Průběh ohybových momentů – normální chod



Maximální moment:

$$M_{o_{maxH1n}} = \sqrt{27\,261^2 + (-50\,475)^2} = 57\,367 \text{ Nmm}$$

#### 4.6.1.2 Průběh ohybových momentů – zpětný chod



Maximální moment:

$$M_{o_{maxH1z}} = \sqrt{24\,259^2 + 49\,345^2} = 54\,985 \text{ Nmm}$$

#### 4.6.1.3 Maximální ohybový moment

$$M_{o_{maxH1}} = \max\{M_{o_{maxH1n}}, M_{o_{maxH1z}}\} = M_{o_{maxH1n}} = 57\,367 \text{ Nmm}$$

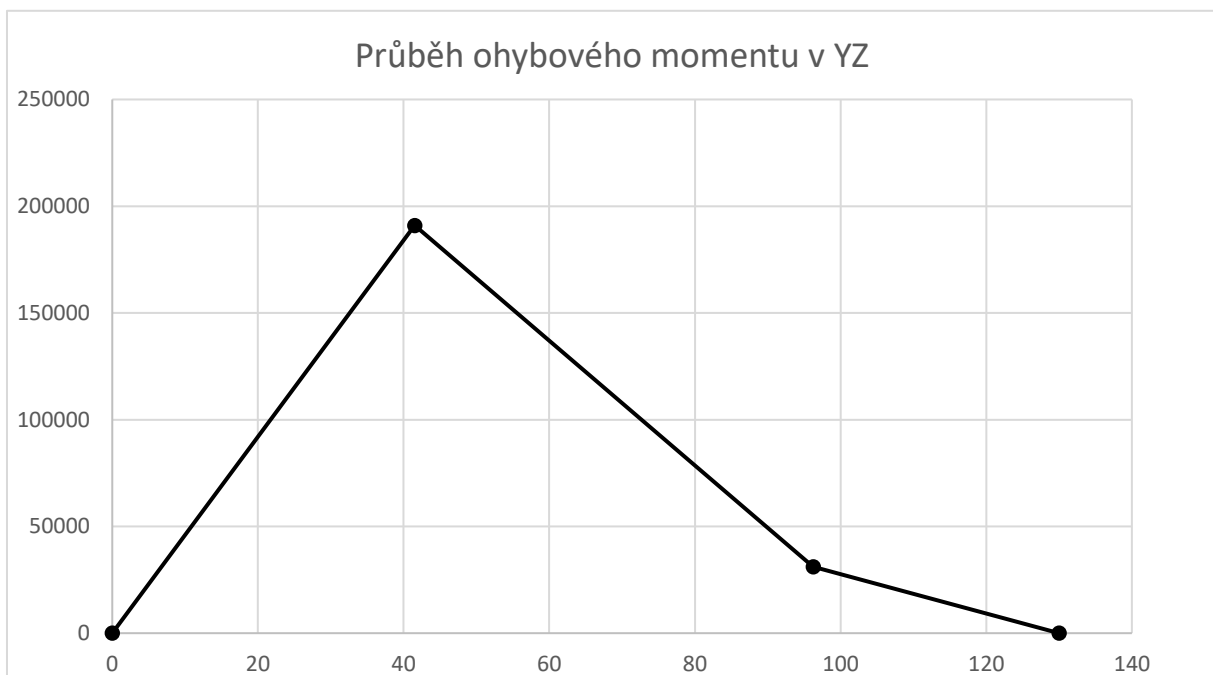
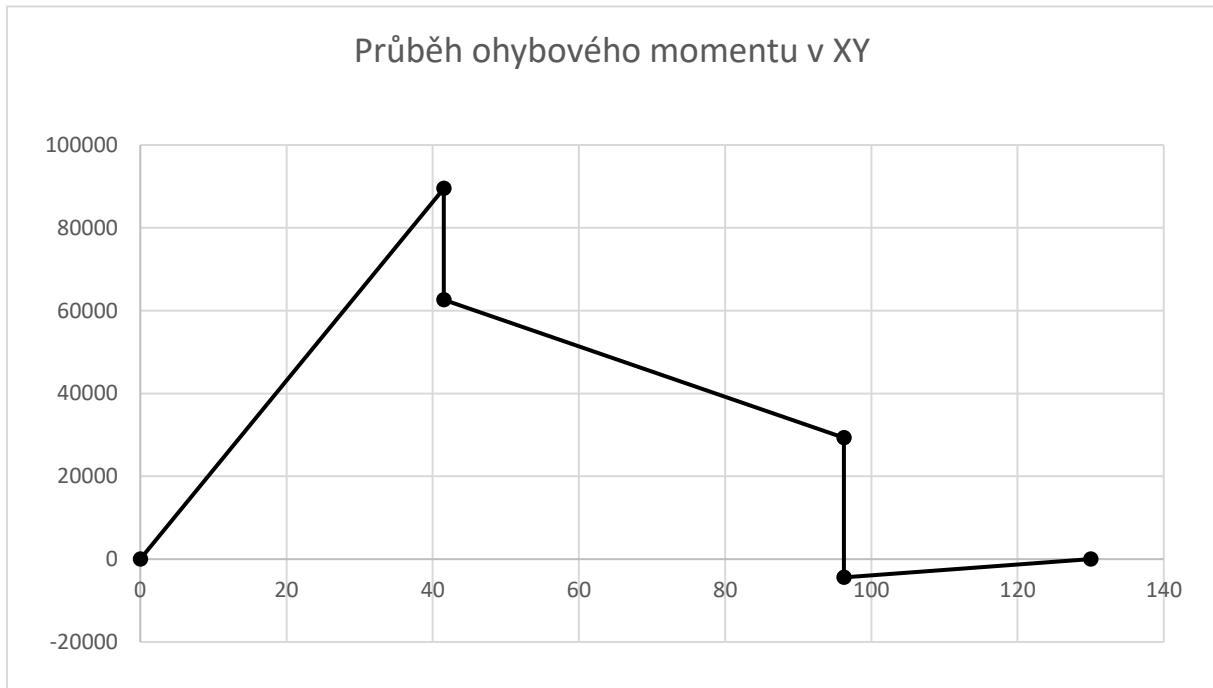
#### 4.6.1.4 Redukované napětí

$$\sigma_{REDH1} \leq \sigma_D \Rightarrow \sqrt{\left(\frac{M_{o_{maxH1}}}{W_o}\right)^2 + 4 * \left(\frac{M_{kH1}}{Wk}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{57\,367}{\frac{\pi * 25^2}{32}}\right)^2 + 4 * \left(\frac{33\,792}{\frac{\pi * 25^2}{16}}\right)^2} = 43,40 \text{ MPa} \leq 70 \text{ MPa}$$

**HŘÍDEL VYHOVUJE**

#### 4.6.2 Předlohová hřídel

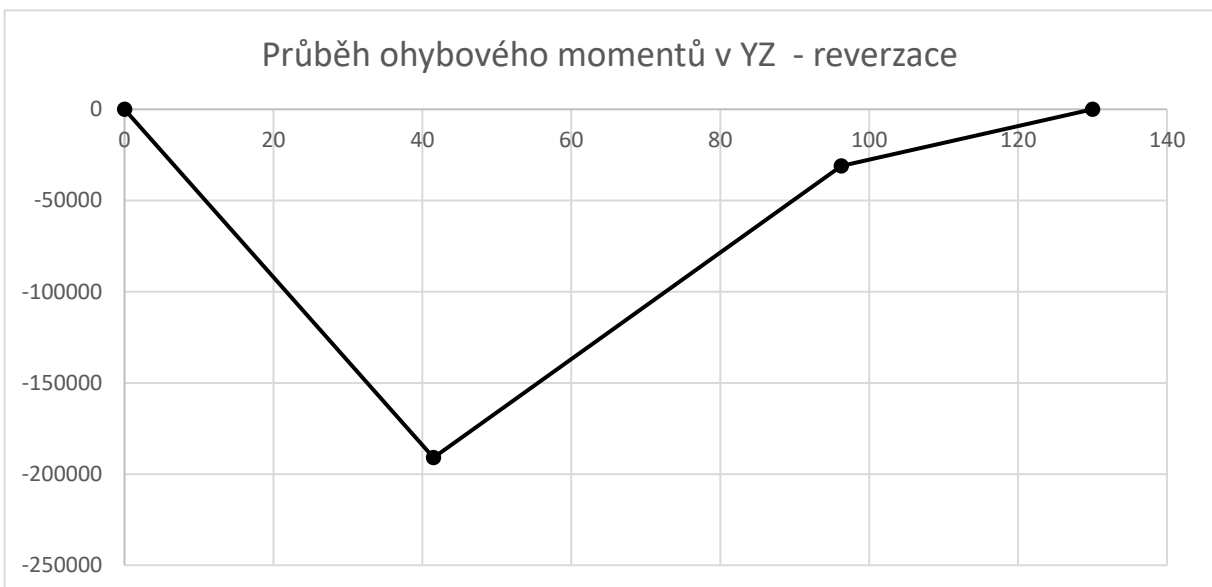
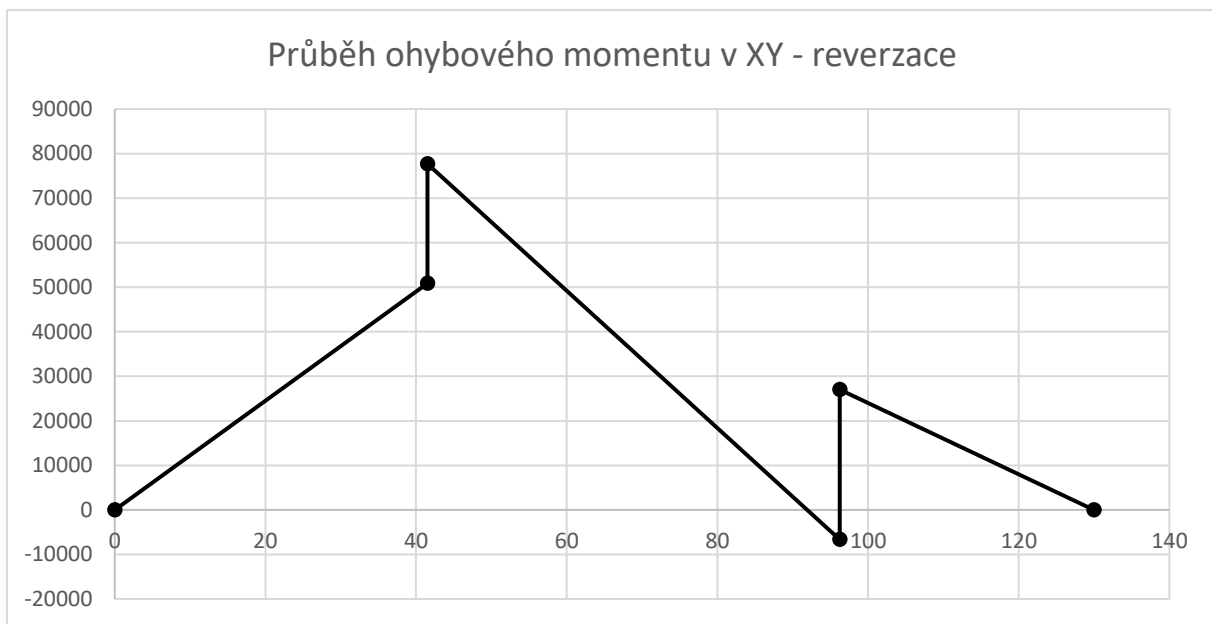
##### 4.6.2.1 Průběh ohybových momentů – normální chod



Maximální moment:

$$M_{0_{maxH2n}} = \sqrt{89\,492^2 + 191\,021^2} = 210\,945 \text{ Nmm}$$

#### 4.6.2.2 Průběh ohybových momentů – zpětný chod



Maximální moment:

$$M_{o_{maxH2z}} = \sqrt{77\,691^2 + (-191\,021)^2} = 197\,671 \text{ Nmm}$$

#### 4.6.2.3 Maximální ohybový moment

$$M_{o_{maxH2}} = \max\{M_{o_{maxH2n}}, M_{o_{maxH2z}}\} = M_{o_{maxH2n}} = 210\,945 \text{ Nmm}$$

#### 4.6.2.4 Redukované napětí

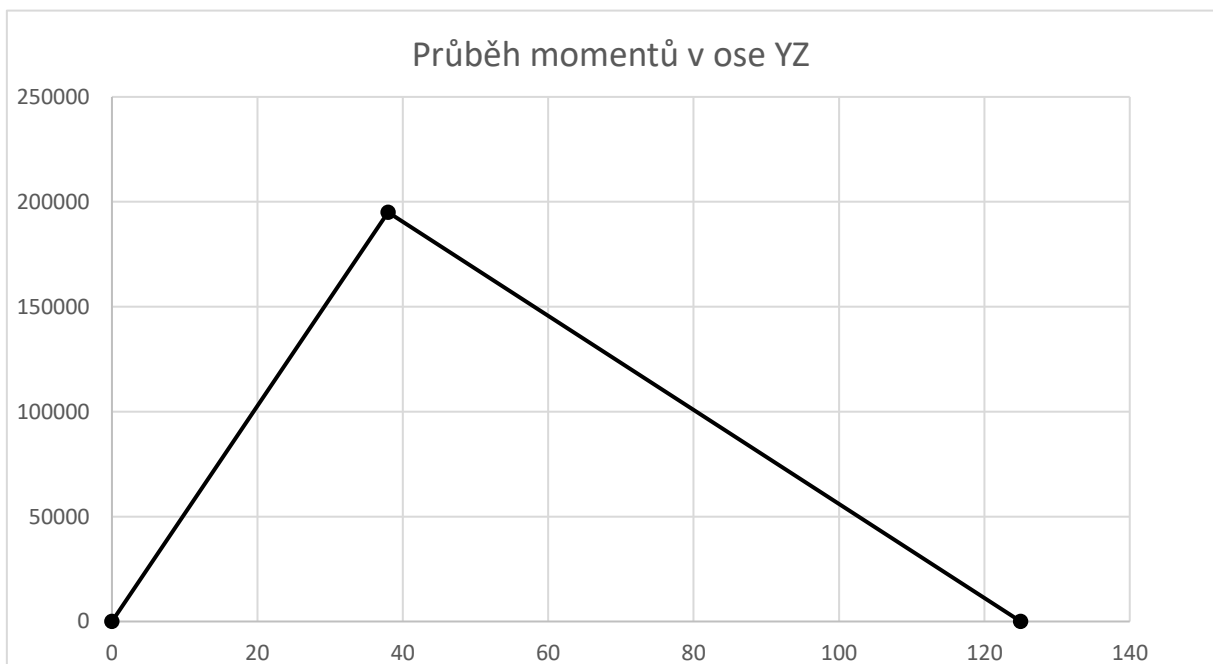
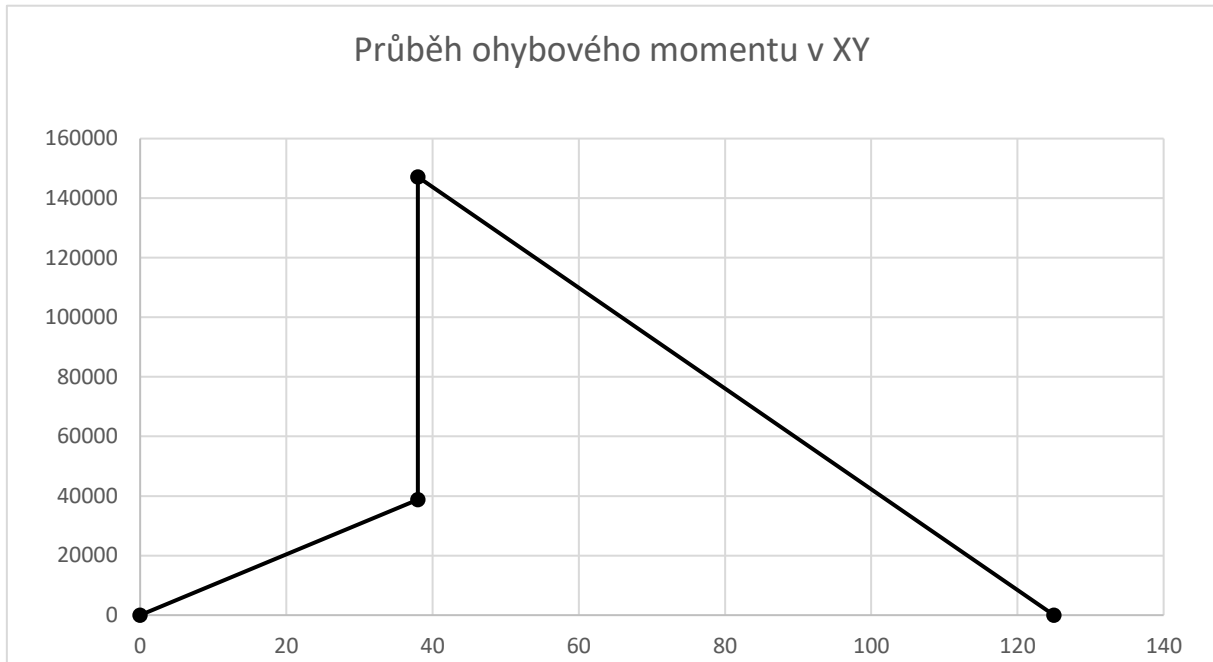
$$\sigma_{REDH2} \leq \sigma_D \Rightarrow \sqrt{\left(\frac{M_{o_{maxH2}}}{W_o}\right)^2 + 4 * \left(\frac{M_{kH2}}{W_k}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{210\,945}{\frac{\pi * 35^2}{32}}\right)^2 + 4 * \left(\frac{191\,057}{\frac{\pi * 35^2}{16}}\right)^2} = 67,61 \text{ MPa}$$

$$\leq 70 \text{ MPa}$$

**HŘÍDEL VYHOVUJE**

#### 4.6.3 Výstupní hřídel

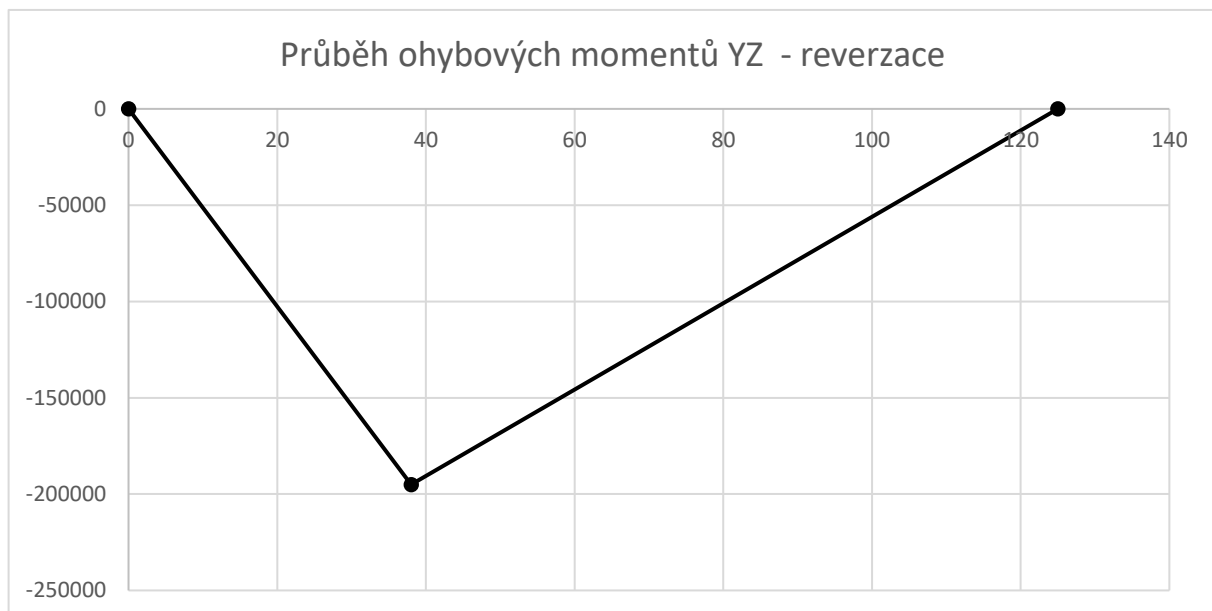
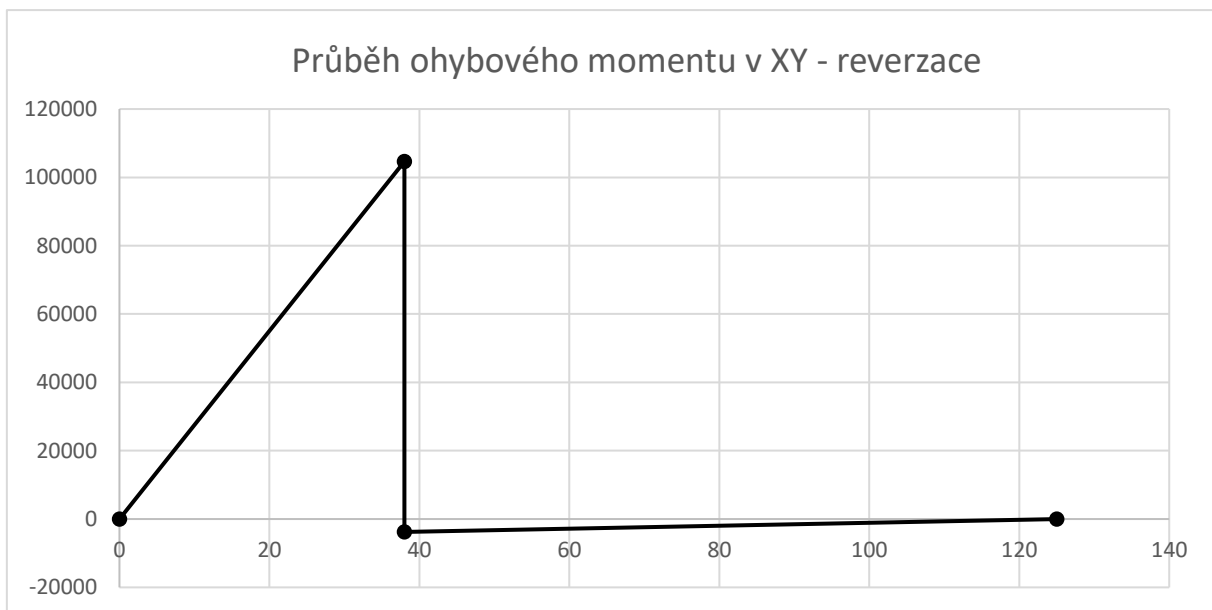
##### 4.6.3.1 Průběh ohybových momentů – normální chod



Maximální moment:

$$M_{O_{maxH3n}} = \sqrt{147\,140^2 + 195\,032^2} = 244\,311 \text{ Nmm}$$

#### 4.6.3.2 Průběh ohybových momentů – zpětný chod



Maximální moment:

$$M_{o_{maxH2z}} = \sqrt{104\,641^2 + (-195\,032)^2} = 221\,331 \text{ Nmm}$$

#### 4.6.3.3 Maximální ohybový moment

$$M_{o_{maxH3}} = \max\{M_{o_{maxH3n}}, M_{o_{maxH3z}}\} = M_{o_{maxH3n}} = 244\,311 \text{ Nmm}$$

#### 4.6.3.4 Redukované napětí

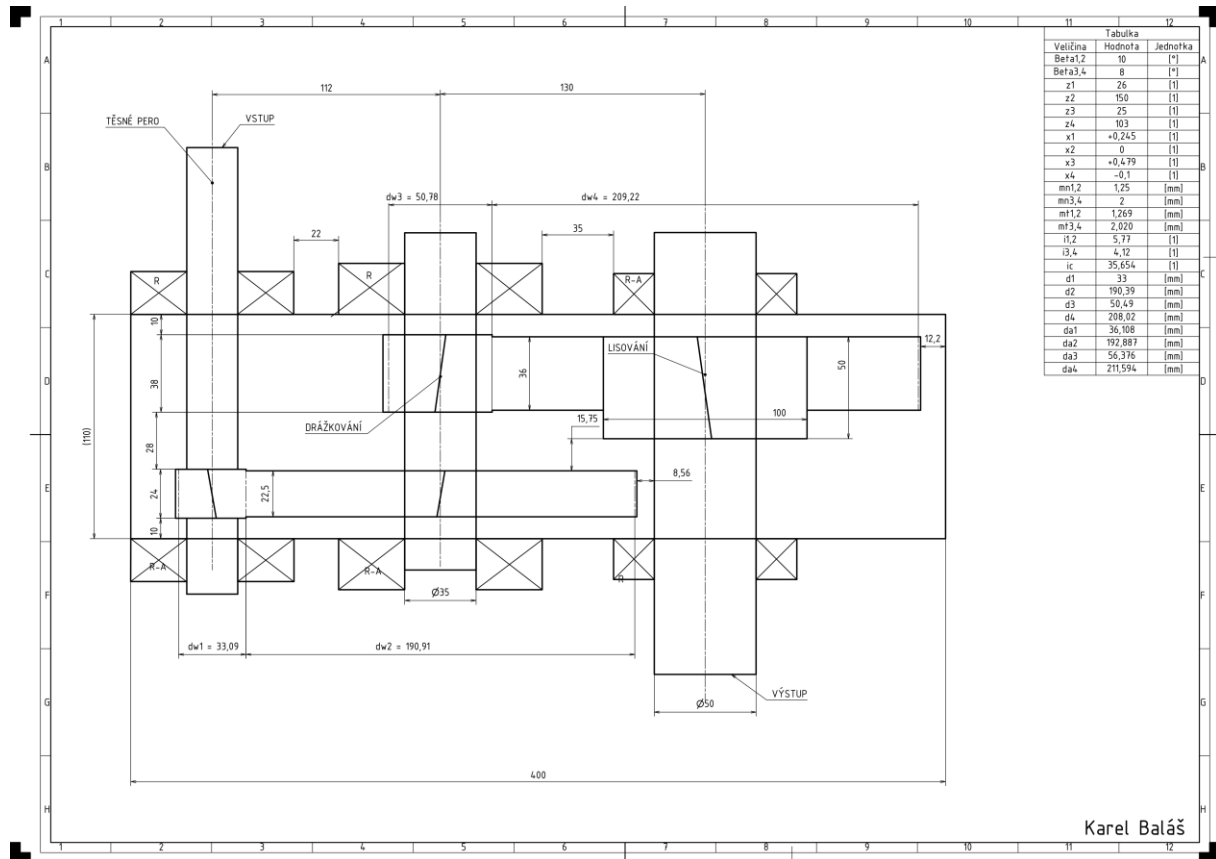
$$\sigma_{REDH3} \leq \sigma_D \Rightarrow \sqrt{\left(\frac{M_{o_{maxH3}}}{W_o}\right)^2 + 4 * \left(\frac{M_{kH3}}{Wk}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{244\,311}{\frac{\pi * 50^2}{32}}\right)^2 + 4 * \left(\frac{771\,410}{\frac{\pi * 50^2}{16}}\right)^2} = 65,94 \text{ MPa}$$

$$\leq 70 \text{ MPa}$$

**HŘÍDEL VYHOVUJE**



## 4.7 Koncepční návrh 2



## 5 Spoje náboj – hřídel

### 5.1 Návrh připojení řemenice

Hřídel s nábojem bude spojena pomocí těsného pera

#### 5.1.1.1 Návrh těsného pera

Volba těsného pera:  $\varnothing$  d hřídele v místě těsného pera  $\varnothing 24$  mm  $\rightarrow$  těsné pero 8x7

#### 5.1.1.2 Délka těsného pera

$$l'_a \geq \frac{4 * M_{kH1}}{d * h * p_D} = \frac{4 * 33,79 * 1\,000}{24 * 7 * 70} = 11,5 \text{ mm}$$
$$l_a = l'_a + b = 11,5 + 8 = 19,5 \text{ mm}$$

Volím těsné pero 8x7 v délce  $l = 32$  mm

#### 5.1.1.3 Kontrola otláčení těsného pera

$$p = \frac{4 * M_{kH1}}{d * h * (l - b)} = \frac{4 * 33,79 * 1\,000}{24 * 7 * (32 - 8)} = 33,5 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

#### 5.1.1.4 Kontrola stříhu těsného pera

$$\tau = \frac{2 * M_{kH1}}{d * h * (l - b)} = \frac{2 * 33,79 * 1\,000}{24 * 7 * (32 - 8)} = 16,8 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

### 5.2 Návrh připojení kola 2 na předlohovou hřídel

Kolo 2 bude s hřídelí spojena pomocí drážkování

#### 5.2.1.1 Návrh drážkování

Drážkování volím s ohledem na průměr hřídele pod ložisky  $\rightarrow$

$d = 42$ mm
$D = 46$ mm
$z = 8$
$b = 8$ mm
$s' = 13,2$ mm <sup>2</sup>

#### 5.2.1.2 Minimální délka drážkování

$$l' \geq \frac{4 * M_{kH2}}{s' * (D + d) * p_D} = \frac{4 * 191,06 * 1\,000}{13,2 * (46 + 42) * 70} = 9,4 \text{ mm}$$

Volím délku drážkování  $l = 17,5$  mm

#### 5.2.1.3 Kontrola otláčení v drážkování

$$p = \frac{4 * M_{kH1}}{s' * (D + d) * l} = \frac{4 * 191,06 * 1\,000}{13,2 * (46 + 42) * 17,5} = 37,6 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

### 5.3 Návrh připojení kola 4 na výstupní hřídel

Kolo 4 bude na hřídel připojeno pomocí lisování

#### 5.3.1.1 Návrh lisování

Lisovací průměr	$d = 63 \text{ mm}$
Průměr náboje kola	$D = 1,8 * d = 1,8 * 63 = 113 \text{ mm}$
Minimální šířka lisování	$L_L = 0,7 * d = 0,7 * 63 = 44 \text{ mm}$
Šířka kola	$L = L_L + 5 = 44 + 5 = 49 \text{ mm}$

#### 5.3.1.2 Minimální tlak ve spoji

$$p_{min} = \frac{1,1 * M_{kH3}}{\pi * d * L_L * f * \frac{d}{2}} = \frac{1,1 * 771,41 * 1000}{\pi * 63 * 44 * 0,12 * \frac{63}{2}} = 25,8 \text{ MPa}$$

#### 5.3.1.3 Minimální přesah

$$\Delta d_{min} = p_{min} * d * \frac{1}{E} * (C_N + 1) = 25,8 * 63 * \frac{1}{2,1 * 10^5} * \left( \frac{113^2 + 63^2}{113^2 - 63^2} + 1 \right) = 22,4 \text{ } \mu\text{m}$$

#### 5.3.1.4 Lisování za studena

##### 5.3.1.4.1 Minimální výrobní přesah

$$\Delta d_{wmin} = \Delta d_{min} + (5,5 * (Ra_{H\ddot{R}} + Ra_{NA})) = 22,4 + (5,5 * (0,8 + 1,6)) = 35,6 \text{ } \mu\text{m}$$

##### 5.3.1.4.2 Návrh uložení

Volím uložení H7/u6

$$H7_0^{+30} / u6_{+87}^{+106}$$

##### 5.3.1.4.3 Minimální přesah dle uložení

$$\Delta d_{minul} = 87 - 30 = 57 \text{ } \mu\text{m} > 22,4 \text{ } \mu\text{m}$$

**VYHOVUJE**

#### 5.3.1.5 Lisování za tepla

##### 5.3.1.5.1 Minimální výrobní přesah

$$\Delta d_{wmin} = \Delta d_{min} = 22,4 \text{ } \mu\text{m}$$

##### 5.3.1.5.2 Návrh uložení

Volím uložení H7/t6

$$H7_0^{+30} / t6_{+66}^{+85}$$

##### 5.3.1.5.3 Minimální přesah dle uložení

$$\Delta d_{minul} = 66 - 30 = 36 \text{ } \mu\text{m} > 22,4 \text{ } \mu\text{m}$$

**VYHOVUJE**

#### 5.3.1.6 Maximální tlak ve spoji za studena/za tepla

##### 5.3.1.6.1 Za studena

$$p_{maxs} = \frac{\Delta d_{max}}{d * \frac{1}{E} * (C_N + 1)} = \frac{\delta_{max} - (5,5 * (Ra_{H\ddot{R}} + Ra_{NA}))}{d * \frac{1}{E} * (C_N + 1)} = \frac{[(106 - 0) - (5,5 * (0,8 + 1,6))] * 10^{-6}}{63 * \frac{1}{2,1 * 10^5} * \left( \frac{113^2 + 63^2}{113^2 - 63^2} + 1 \right)} = 106,9 \text{ MPa}$$

##### 5.3.1.6.2 Za tepla

$$p_{maxt} = \frac{\Delta d_{max}}{d * \frac{1}{E} * (C_N + 1)} = \frac{\delta_{max}}{d * \frac{1}{E} * (C_N + 1)} = \frac{(85 - 0) * 10^{-6}}{63 * \frac{1}{2,1 * 10^5} * \left( \frac{113^2 + 63^2}{113^2 - 63^2} + 1 \right)} = 97,9 \text{ MPa}$$

5.3.1.7 Maximální tlak ve spoji

$$p_{max} = \max\{p_{maxs}, p_{maxt}\} = p_{maxs} = 106,9 \text{ MPa}$$

5.3.1.8 Redukované napětí

$$\sigma_{RED} = p_{max} * (C_N + 1) = 106,9 * \left( \frac{113^2 + 63^2}{113^2 - 63^2} + 1 \right) = 309,3 \text{ MPa}$$

5.3.1.9 Bezpečnost

$$k = \frac{\sigma_{Kt}}{\sigma_{RED}} = \frac{490}{309,3} = 1,58 > 1,1$$

**VYHOVUJE**

5.3.1.10 Potřebná lisovací síla pro lisování

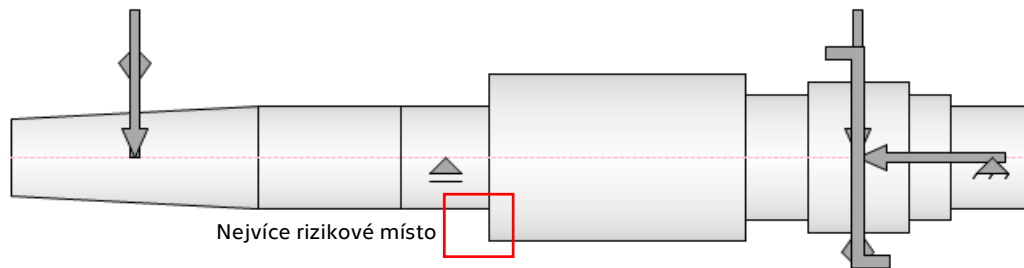
$$F_{LIS} = \pi * d * L_L * p_{maxs} = \pi * 63 * 44 * 106,9 = 111,7 \text{ kN}$$

5.3.1.11 Potřebné ohřátí náboje pro lisování

$$\Delta T = \frac{\Delta d_{max} + v}{\alpha * d} = \frac{(85 + 36) * 10^{-6}}{11,5 * 10^{-6} * 63} = 167 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 6 Dynamická kontrola vstupní hřídele

### 6.1 Kontrola únavové pevnosti



Dle [5] pro  $d = 25 \text{ mm}$ ,  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $R = 1,2 \text{ mm}$ :

$$\begin{aligned}\alpha_t &= 1,65 \\ \alpha_o &= 2,3 \\ q &= 0,65 \\ \eta_p &= 0,90 \\ \varepsilon_v &= 0,78 \\ \sigma_{c(-1)} &= 300 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\beta_o = 1 + q * (\alpha_o - 1) = 1 + 0,65 * (2,3 - 1) = 1,85$$

$$\beta_t = 1 + q * (\alpha_t - 1) = 1 + 0,65 * (1,65 - 1) = 1,42$$

$$\sigma_{c(-1)o}^* = \sigma_{c(-1)} \frac{\varepsilon_v * \eta_p}{\beta_o} = 300 * \frac{0,78 * 0,90}{1,85} = 113,84 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c(-1)t}^* = \sigma_{c(-1)} \frac{\varepsilon_v * \eta_p}{\beta_t} = 300 * \frac{0,78 * 0,90}{1,42} = 148,3 \text{ MPa}$$

V rizikovém místě

$$\sigma_a = \sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{20\,000}{\frac{\pi * 25^3}{32}} = 13,04 \text{ MPa}$$

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{c(-1)o}^*}{\sigma_a} = \frac{113,84}{13,04} = 8,5$$

$$\tau = \frac{M_{kH1}}{Wk} = \frac{33\,792}{\frac{\pi * 25^3}{16}} = 11,01 \text{ MPa}$$

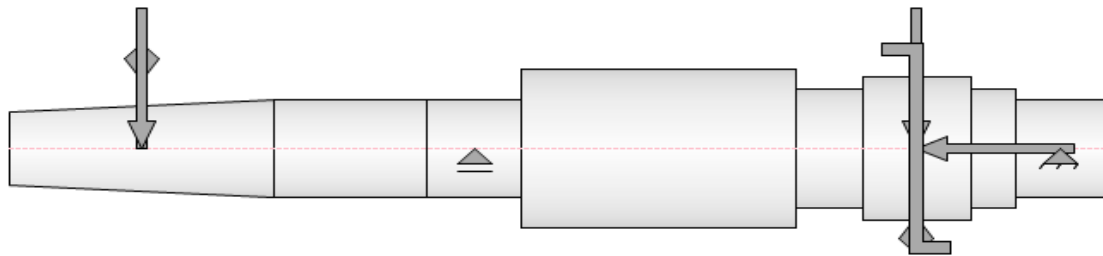
$$k_\tau = \frac{\sigma_{c(-1)t}^*}{\tau} = \frac{148,3}{11,01} = 13,4$$

$$\frac{1}{k_d^2} = \frac{1}{k_\sigma^2} + \frac{1}{k_\tau^2} \Rightarrow k_d = \sqrt{\frac{k_\sigma^2 * k_\tau^2}{k_\sigma^2 + k_\tau^2}} = \sqrt{\frac{8,5^2 * 13,4^2}{8,5^2 + 13,4^2}} = 7,18 > 1,5$$

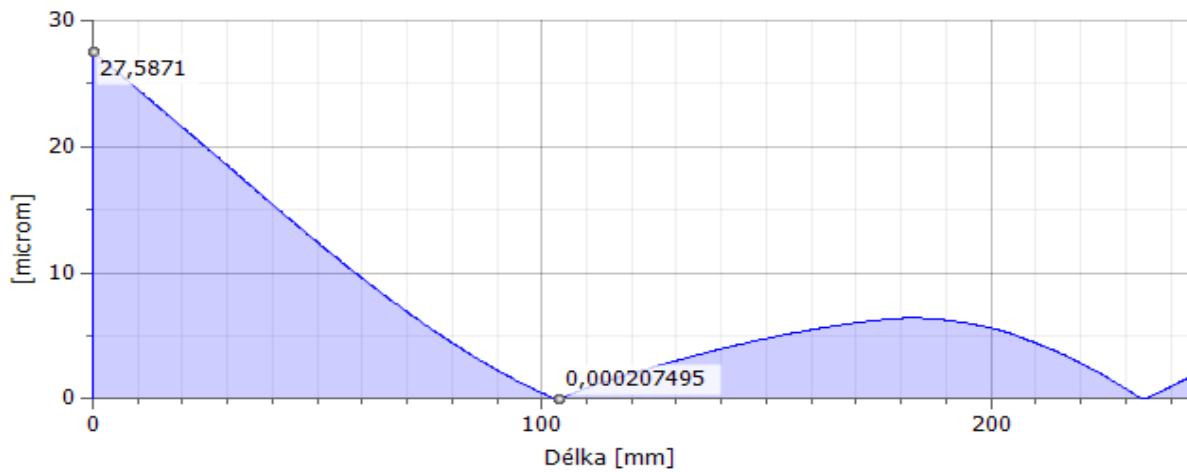
**VYHOVUJE**

## 6.2 Kontrola tuhosti

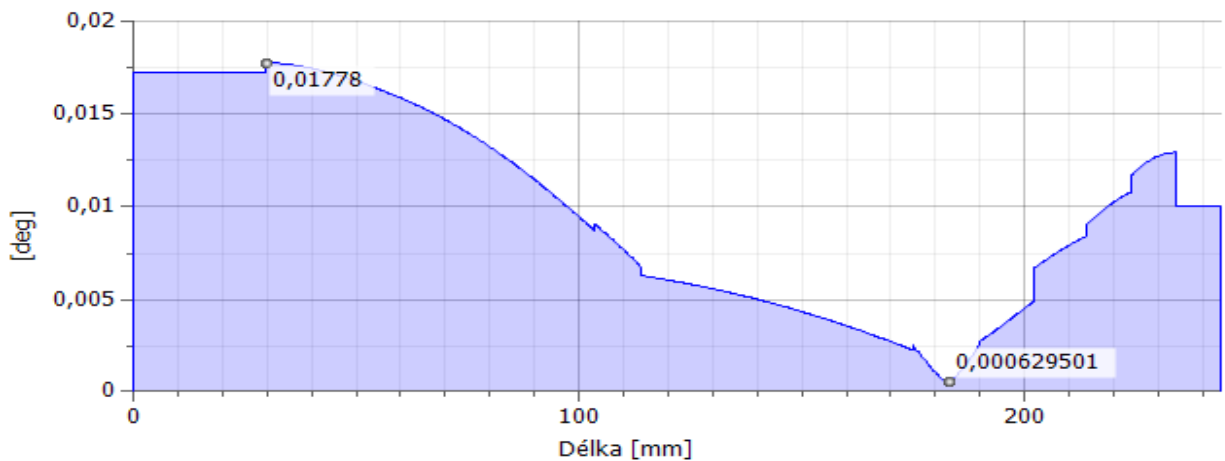
Dle AUTODESK INVENTOR 2018 – generátor hřídelí



### 6.2.1 Průhyb hřídele



### 6.2.2 Natočení hřídele



### 6.2.3 Dovolené hodnoty průhybů, průhybů v ozubení a natočení v kolech a natočení v podporách

$$y_{D\text{MAX}} = \frac{l}{3000} = \frac{136 * 1000}{3000} = 44 \mu\text{m}$$

$$y_{DK} = \frac{m_{n1,2}}{100} = \frac{1,25 * 1000}{100} = 12,5 \mu\text{m}$$

$$\varphi_{DK} = 5 \text{ úhlových minut}$$

$$\varphi_{DL} = 7 \text{ úhlových minut}$$

#### 6.2.4 Průhyb mezi ložisky

$$y_{MAX} = 6,46 \mu m < 44 \mu m$$

**VYHOVUJE**

#### 6.2.5 Průhyb v ozubení

$$y_K = 6,3 \mu m < 12,5 \mu m$$

**VYHOVUJE**

#### 6.2.6 Natočení v ozubení

$$\varphi_K = 30 \text{ úhlových sekund} < 5 \text{ úhlových minut}$$

**VYHOVUJE**

#### 6.2.7 Natočení v podporách

$$\varphi_l = 45 \text{ úhlových sekund} < 7 \text{ úhlových minut}$$

**VYHOVUJE**

#### 6.2.8 Maximální průhyb

$$\varphi_{MAX} = 1 \text{ úhlová minuta}$$

## 7 Závěr

V této technické zprávě jsou výpočty, které byly provedeny pro návrh dvoustupňové čelní převodovky se šikmým ozubením. V první části této zprávy je zadání k této převodovce. V druhé části se nachází návrh pohonu. Třetí část obsahuje návrh samotné převodovky, čtvrtá část obsahuje kontrolní výpočty. V páté části jsou řešeny spoje náboj – hřídel a v poslední šesté je dynamická kontrola vstupní hřídele.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] KUGL, Otmar. *Projekt: III. ročník*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01638-2.
- [2] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: příklady*. Vyd. 4. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04137-6.
- [3] Kontrola ozubení dle ISO 6336. In: *Systém elektronické podpory studia* [online]. Praha: ČVUT, 1999 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://seps.fs.cvut.cz/KC>
- [4] Kuličkový ložiska. SKF [online]. SKF, 2018 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/loads/index.html>
- [5] ŘEZNÍČEK, Jan. *Pružnost a pevnost II – Přednášky*. Praha, 2017. Přednáškové podklady. České vysoké učení technické v Praze.