

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

DVOURÝCHLOSTNÍ PŘEVODOVKA

TWO-SPEED GEARBOX

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN KRATĚNA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL ŽDÍMAL, CSC

BRNO 2008

Anotace

Cílem této práce bylo vytvořit „Technickou dokumentaci k dvoustupňové převodovce“. Zadání obsahovalo stručný obsah požadované práce. Nejprve byl proveden výpočet převodového poměru, rozměry ozubení a modul. Následně byl proveden výpočet zatížení jednotlivých ozubených kol a jejich bezpečnost. Po výpočtu ozubení následoval výpočet hřídele, ložisek a pera. Technická dokumentace byla doplněna obrázky a tabulkami, které názorně popisují jednotlivá místa zatížení. K této dokumentaci byl vytvořen i 3D model dvoustupňové převodovky včetně podrobných výkresů jednotlivých hřídelí a ozubených kol.

Klíčová slova: převodový poměr, otáčky, namáhání, bezpečnost, modul ozubení, šířka ozubení

Annotation

The objective of this work was to create the „Technical Documentation of Two-Speed Transmission“. The submission included a brief content of the demanded work. At first, calculations of gear ratio, tooth system dimensions and module were performed. Subsequently calculations of single tooth wheel loads and their safety were performed. After the tooth system calculation the shaft, bearings and key calculations followed. The Technical Documentation was completed with pictures and charts that illustrate the individual load points. A 3D model of the two-speed transmission inclusive detailed drawings of the individual shafts and tooth wheels were created as a part of the documentation as well.

Key words: gear ratio, revolutions, stress, safety, tooth system module, tooth system width

Bibliografická citace mé práce:

KRATĚNA, J. Dvourychlostní převodovka. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Ždímal, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovával sám, s pomocí vedoucího bakalářské práce, literatury a ostatních materiálů, které jsou uvedeny v použité literatuře.

V Brně, dne 1. 10. 2008

.....

Podpis

Obsah

1 Úvod	6
2 Předběžný návrh ozubení	7
2.1 Návrh převodových poměrů	7
2.2 Výpočet otáček hřídelí	8
2.3 Výpočet kroutících momentů	9
2.4 Výpočet modulu ozubení m	9
2.5 Výpočet hlavních rozměrů čelního ozubeného soukolí	9
2.5.1 Průměry roztečných kružnic	9
2.5.2 Průměry hlavových kružnic	10
2.5.3 Průměry patních kružnic	11
2.5.4 Průměry základních kružnic	11
2.5.5 Osová vzdálenost	12
2.5.6 Rozměry zubu	12
2.6 Součinitel záběru profilu	12
3 Pevnostní výpočet ozubených kol	13
3.1 Výpočet sil působících v zubech	13
3.1.1 Síla tečná	13
3.1.2 Síla radiální	14
3.2 Kontaktní únavové poškození boků zubů – pitting	15
3.2.1 Redukovaný modul pružnosti	15
3.2.2 Redukovaný poloměr křivosti	15
3.3 Pevnostní výpočet v ohybu	16
3.3.1 Jmenovité napětí v ohybu	16
3.3.2 Srovnávací ohybové napětí v patě zubu σ_F	18
3.3.3 Výpočet součinitele bezpečnosti na ohyb S_F	21
3.4 Pevnostní výpočet v dotyku	23
3.4.1 Jmenovité kontaktní napětí	23
3.4.2 Srovnávací kontaktní napětí ve valivém bodě	25
3.4.3 Součinitel bezpečnosti v dotyku S_H	26
4 Návrh průměru hřídele	29
4.1 Volba materiálu	30
4.2 Výpočet ohybového momentu	30
4.3 Výpočet napětí v jednotlivých průřezech	30
4.3.1 Kontrolní výpočet – statický přístup	32
4.4 Reakce v podporách	34
4.5 Torzní tuhost hřídele	34
5 Výpočet ložisek	35
6 Výpočet pera	36
7 Závěr	37
8 Seznam použitých zdrojů	38
9 Seznam symbolů a jednotek	39
10 Přílohy	41

1 Úvod

U obráběcích strojů a vůbec v celém strojírenství se setkáváme s různými typy převodovek. Tato zařízení jsou velice důležitou součástí obráběcích nebo i jiných strojů. Slouží nám ke zpomalení nebo zrychlení výsledných otáček a změně kroutícího momentu. Při zvolení špatné převodovky se může stát, že stroj, který by jinak skvěle pracoval, je omezen ve svém rozsahu vlivem chybně zvolené převodovky. Existuje mnoho druhů převodovek, ať již se jedná o převodovky jednostupňové nebo vícešupňové. Jejich konstrukce a výpočet je poměrně složitý a zdlouhavý. Naštěstí v dnešní době se již mnoho různých firem zabývá vývojem převodovek a tak je z čeho vybírat.

Cílem této bakalářské práce je názorně si předvést jak se má postupovat při navrhování a vypracovávání dokumentace dvoustupňové převodovky. V této práci lze nalézt podrobné výpočty a následné pevnostní kontroly této převodovky.

2 Předběžný návrh ozubení

2.1 Návrh převodových poměrů

Převodový poměr sousledný

$$u'_{p1} = 11,5$$

$$u'_{3,4} = \sqrt{2 \cdot (u_{p1} - 4)} = \sqrt{2 \cdot (11,5 - 4)} = \sqrt{15} = 3,87 \quad (1)$$

$$u'_{1,2} = \frac{u_p}{u_{3,4}} = \frac{11,5}{3,87} = 2,97 \quad (2)$$

Převodový poměr nesousledný

$$u'_{p2} = 8$$

$$u'_{1,5} = 1$$

$$u'_{5,6} = \sqrt{2 \cdot (u_{p2} - 4)} = \sqrt{2 \cdot (8 - 4)} = \sqrt{8} = 2,83 \quad (3)$$

$$u'_{7,4} = \frac{u_p}{u_{1,6}} = \frac{8}{2,83} = 2,82 \quad (4)$$

Volba počtu zubů

$$z_1 = 20$$

$$z_2 = u'_{1,2} \cdot z_1 = 2,97 \cdot 20 = 59,4 \approx 59 \quad (5)$$

$$z_3 = 18$$

$$z_4 = u'_{3,4} \cdot z_3 = 3,87 \cdot 18 = 69,66 \approx 70 \quad (6)$$

$$z_5 = 20$$

$$z_6 = u'_{1,6} \cdot z_1 = 2,83 \cdot 20 = 56,6 \approx 57 \quad (7)$$

$$z_7 = \frac{z_4}{u'_{7,4}} = \frac{70}{2,82} = 24,82 \approx 25 \quad (8)$$

Skutečné převodové poměry

Sousledný

$$u_{1,2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{59}{20} = 2,95 \quad (9)$$

$$u_{3,4} = \frac{z_4}{z_3} = \frac{70}{18} = 3,89 \quad (10)$$

Nesousledný

$$u_{1,5} = \frac{z_5}{z_1} = \frac{20}{20} = 1 \quad (11)$$

$$u_{5,6} = \frac{z_6}{z_5} = \frac{57}{20} = 2,85 \quad (12)$$

$$u_{7,4} = \frac{z_4}{z_7} = \frac{70}{25} = 2,8 \quad (13)$$

Kontrola převodového poměru

Navržený převodový poměr se nesmí lišit od zadaného o více jak 1%.

Sousledný převod

$$u_{p1} = u_{1,2} \cdot u_{3,4} = 2,95 \cdot 3,89 = 11,48 \quad (14)$$

$$\frac{|u'_{p1} - u_{p1}|}{u'_{p1}} = \frac{|11,5 - 11,48|}{11,5} = 0,0017 < 0,115 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (15)$$

Nesousledný převod

$$u_{p2} = u_{1,5} \cdot u_{5,6} \cdot u_{7,4} = 1 \cdot 2,85 \cdot 2,8 = 7,98 \quad (16)$$

$$\frac{|u'_{p2} - u_{p2}|}{u'_{p2}} = \frac{|8 - 7,98|}{8} = 0,0025 < 0,08 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (17)$$

2.2 Výpočet otáček hřídelí

$$\text{Obecný vzorec: } n_y = \frac{n_x}{u_{x,y}} \quad (18)$$

Otáčky hřídele 2 s ozubeným kolem 3

$$n_2 = \frac{n_1}{u_{1,2}} = \frac{50}{2,95} = 16,95 \text{ ot/s}^{-1}$$

Otáčky hřídele 5 s ozubeným kolem 5

$$n_5 = \frac{n_1}{u_{1,5}} = \frac{50}{1} = 50 \text{ ot/s}^{-1}$$

Otáčky hřídele 6 s ozubeným kolem 7

$$n_6 = \frac{n_5}{u_{5,6}} = \frac{50}{2,85} = 17,54 \text{ ot/s}^{-1}$$

Otáčky hřídele 4 při sousledných otáčkách s ozubeným kolem 4

$$n_4 = \frac{n_1}{u_{p1}} = \frac{50}{11,48} = 4,36 \text{ ot/s}^{-1}$$

Otáčky hřídele 4 při nesousledných otáčkách s ozubeným kolem 4

$$n_4 = \frac{n_1}{u_{p2}} = \frac{50}{7,98} = 6,27 \text{ ot/s}^{-1}$$

2.3 Výpočet kroutících momentů

Obecný vzorec: $M_{kx} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P}{n_x}$ (19)

Kroutící moment na hřídeli 1

$$M_{k1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P}{n_1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{550}{50} = 1,75 \text{ Nm}$$

Kroutící moment na hřídeli 3

$$M_{k3} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P}{n_2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{550}{16,95} = 5,16 \text{ Nm}$$

Kroutící moment na hřídeli 4 při sousledných otáčkách

$$M_{k4} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P}{n_4} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{550}{4,36} = 20,08 \text{ Nm}$$

Kroutící moment na hřídeli 4 při nesousledných otáčkách

$$M_{k4} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P}{n_4} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{550}{6,27} = 13,96 \text{ Nm}$$

Kroutící moment na hřídeli 7

$$M_{k7} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P}{n_6} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{550}{17,54} = 4,99 \text{ Nm}$$

2.4 Výpočet modulu ozubení m

Obecný vzorec: $m = 0,407 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{c \cdot \psi \cdot z_x \cdot n_x}}$ (20)

Voleno dle skript: $\psi = 15$

$$c = 7 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$m = 0,407 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{c \cdot \psi \cdot z_1 \cdot n_1}} = 0,407 \cdot \sqrt[3]{\frac{550}{7 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 20 \cdot 50}} = 0,407 \cdot \sqrt[3]{0,000000006} = 0,00071 \text{ m}$$

$$m = 0,00071 \cdot 1000 = 0,71 \text{ mm}$$

Podle ČSN 01 4608 /2 je $m = 0,8 \text{ mm}$

2.5 Výpočet hlavních rozměrů čelního ozubeného soukolí

2.5.1 Průměry roztečných kružnic

Obecný vzorec: $d_x = z_x \cdot m$ (21)

Průměr roztečné kružnice kola 1

$$d_1 = z_1 \cdot m = 20 \cdot 0,8 = 16\text{mm}$$

Průměr roztečné kružnice kola 2

$$d_2 = z_2 \cdot m = 59 \cdot 0,8 = 47,2\text{mm}$$

Průměr roztečné kružnice kola 3

$$d_3 = z_3 \cdot m = 18 \cdot 0,8 = 14,4\text{mm}$$

Průměr roztečné kružnice kola 4

$$d_4 = z_4 \cdot m = 70 \cdot 0,8 = 56\text{mm}$$

Průměr roztečné kružnice kola 5

$$d_5 = z_5 \cdot m = 20 \cdot 0,8 = 16\text{mm}$$

Průměr roztečné kružnice kola 6

$$d_6 = z_6 \cdot m = 57 \cdot 0,8 = 45,6\text{mm}$$

Průměr roztečné kružnice kola 7

$$d_7 = z_7 \cdot m = 25 \cdot 0,8 = 20\text{mm}$$

2.5.2 Průměry hlavových kružnic

Obecný vzorec: $d_{ax} = d_x + 2 \cdot h$

(22)

Průměr hlavové kružnice kola 1

$$d_{a1} = d_1 + 2 \cdot h = 16 + 2 \cdot 0,8 = 17,6\text{mm}$$

Průměr hlavové kružnice kola 2

$$d_{a2} = d_2 + 2 \cdot h = 47,2 + 2 \cdot 0,8 = 48,8\text{mm}$$

Průměr hlavové kružnice kola 3

$$d_{a3} = d_3 + 2 \cdot h = 14,4 + 2 \cdot 0,8 = 16\text{mm}$$

Průměr hlavové kružnice kola 4

$$d_{a4} = d_4 + 2 \cdot h = 56 + 2 \cdot 0,8 = 57,6\text{mm}$$

Průměr hlavové kružnice kola 5

$$d_{a5} = d_5 + 2 \cdot h = 16 + 2 \cdot 0,8 = 17,6\text{mm}$$

Průměr hlavové kružnice kola 6

$$d_{a6} = d_6 + 2 \cdot h = 45,6 + 2 \cdot 0,8 = 47,2\text{mm}$$

Průměr hlavové kružnice kola 7

$$d_{a7} = d_7 + 2 \cdot h = 20 + 2 \cdot 0,8 = 21,6\text{mm}$$

2.5.3 Průměry patních kružnic

Obecný vzorec: $d_{fx} = d_x - 2 \cdot h_f$ (23)

Průměr patní kružnice kola 1

$$d_{f1} = d_1 - 2 \cdot h_f = 16 - 2 \cdot 0,8 \cdot 1,25 = 14\text{mm}$$

Průměr patní kružnice kola 2

$$d_{f2} = d_2 - 2 \cdot h_f = 47,2 - 2 \cdot 0,8 \cdot 1,25 = 45,2\text{mm}$$

Průměr patní kružnice kola 3

$$d_{f3} = d_3 - 2 \cdot h_f = 14,4 - 2 \cdot 0,8 \cdot 1,25 = 12,4\text{mm}$$

Průměr patní kružnice kola 4

$$d_{f4} = d_4 - 2 \cdot h_f = 56 - 2 \cdot 0,8 \cdot 1,25 = 54\text{mm}$$

Průměr patní kružnice kola 5

$$d_{f5} = d_5 - 2 \cdot h_f = 16 - 2 \cdot 0,8 \cdot 1,25 = 14\text{mm}$$

Průměr patní kružnice kola 6

$$d_{f6} = d_6 - 2 \cdot h_f = 45,6 - 2 \cdot 0,8 \cdot 1,25 = 43,6\text{mm}$$

Průměr patní kružnice kola 7

$$d_{f7} = d_7 - 2 \cdot h_f = 20 - 2 \cdot 0,8 \cdot 1,25 = 18\text{mm}$$

2.5.4 Průměry základních kružnic

Obecný vzorec: $d_{bx} = d_x \cdot \cos \alpha$ (24)

Průměr základní kružnice kola 1

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha = 16 \cdot 0,94 = 15,04\text{mm}$$

Průměr základní kružnice kola 2

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha = 47,2 \cdot 0,94 = 44,37\text{mm}$$

Průměr základní kružnice kola 3

$$d_{b3} = d_3 \cdot \cos \alpha = 14,4 \cdot 0,94 = 13,53\text{mm}$$

Průměr základní kružnice kola 4

$$d_{b4} = d_4 \cdot \cos \alpha = 56 \cdot 0,94 = 52,64\text{mm}$$

Průměr základní kružnice kola 5

$$d_{b5} = d_5 \cdot \cos \alpha = 16 \cdot 0,94 = 15,04\text{mm}$$

Průměr základní kružnice kola 6

$$d_{b6} = d_6 \cdot \cos \alpha = 45,6 \cdot 0,94 = 42,86\text{mm}$$

Průměr základní kružnice kola 7

$$d_{b7} = d_7 \cdot \cos \alpha = 20 \cdot 0,94 = 18,8\text{mm}$$

2.5.5 Osová vzdálenost

$$\text{Obecný vzorec: } a = 0,5 \cdot (d_x + d_y) \quad (25)$$

Mezi kolem 1 a 2

$$a = 0,5 \cdot (d_1 + d_2) = 0,5 \cdot (16 + 47,2) = 31,6\text{mm}$$

Mezi kolem 3 a 4

$$a = 0,5 \cdot (d_3 + d_4) = 0,5 \cdot (14,4 + 56) = 35,2\text{mm}$$

Mezi kolem 1 a 5

$$a = 0,5 \cdot (d_1 + d_5) = 0,5 \cdot (16 + 16) = 16\text{mm}$$

Mezi kolem 5 a 6

$$a = 0,5 \cdot (d_5 + d_6) = 0,5 \cdot (16 + 45,6) = 30,8\text{mm}$$

Mezi kolem 7 a 4

$$a = 0,5 \cdot (d_7 + d_4) = 0,5 \cdot (20 + 56) = 38\text{mm}$$

2.5.6 Rozměry zubu**Výška hlavy zubu**

$$h_a = m \Rightarrow h_a = 0,8\text{mm} \quad (26)$$

Výška paty zubu

$$h_f = 1,25 \cdot m = 1,25 \cdot 0,8 = 1\text{mm} \quad (27)$$

Výška zubu

$$h = 2,25 \cdot m = 2,25 \cdot 0,8 = 1,8\text{mm} \quad (28)$$

Šířka kola

$$b_1 = \Psi \cdot m = 15 \cdot 0,8 = 12\text{mm} \quad (29)$$

$$b_2 = \Psi \cdot m = 25 \cdot 0,8 = 20\text{mm} \quad (30)$$

2.6 Součinitel záběru profilu

$$\text{Obecný vzorec: } \varepsilon_{\alpha x, y} = \frac{\sqrt{d_{ax}^2 - d_{bx}^2} + \sqrt{d_{ay}^2 - d_{by}^2} - 2 \cdot a_{x, y} \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot \cos \alpha} \quad (31)$$

Součinitel záběru ozubeného kola 1a2

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\alpha 1,2} &= \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2 \cdot a_{1,2} \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{\sqrt{17,6^2 - 15,04^2} + \sqrt{48,8^2 - 44,37^2} - 2 \cdot 31,6 \cdot \sin 20^\circ}{2 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot \cos 20^\circ} = 1,66\end{aligned}$$

Součinitel záběru ozubeného kola 3a4

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\alpha 3,4} &= \frac{\sqrt{d_{a3}^2 - d_{b3}^2} + \sqrt{d_{a4}^2 - d_{b4}^2} - 2 \cdot a_{3,4} \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{\sqrt{16^2 - 13,53^2} + \sqrt{57,6^2 - 52,64^2} - 2 \cdot 35,2 \cdot \sin 20^\circ}{2 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot \cos 20^\circ} = 1,66\end{aligned}$$

Součinitel záběru ozubeného kola 1a5

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\alpha 1,5} &= \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a5}^2 - d_{b5}^2} - 2 \cdot a_{1,5} \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{\sqrt{17,6^2 - 15,04^2} + \sqrt{17,6^2 - 15,04^2} - 2 \cdot 16 \cdot \sin 20^\circ}{2 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot \cos 20^\circ} = 1,55\end{aligned}$$

Součinitel záběru ozubeného kola 5a6

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\alpha 5,6} &= \frac{\sqrt{d_{a5}^2 - d_{b5}^2} + \sqrt{d_{a6}^2 - d_{b6}^2} - 2 \cdot a_{5,6} \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{\sqrt{17,6^2 - 15,04^2} + \sqrt{47,2^2 - 42,86^2} - 2 \cdot 30,8 \cdot \sin 20^\circ}{2 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot \cos 20^\circ} = 1,66\end{aligned}$$

Součinitel záběru ozubeného kola 4a7

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\alpha 4,7} &= \frac{\sqrt{d_{a4}^2 - d_{b4}^2} + \sqrt{d_{a7}^2 - d_{b7}^2} - 2 \cdot a_{4,7} \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot \cos \alpha} = \\ &= \frac{\sqrt{57,6^2 - 52,64^2} + \sqrt{21,6^2 - 18,8^2} - 2 \cdot 38 \cdot \sin 20^\circ}{2 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot \cos 20^\circ} = 1,7\end{aligned}$$

3 Pevnostní výpočet ozubených kol

3.1 Výpočet sil působících v zubech

3.1.1 Síla tečná

$$\text{Obecný vzorec: } F_{tx,y} = \frac{2 \cdot M_{kx}}{d_x} \quad (32)$$

Zatížení ozubeného kola 1a2 při sousledných otáčkách

$$F_{t1,2} = \frac{2 \cdot M_{k1}}{d_1} = \frac{2 \cdot 1,75}{0,016} = 218,75 \text{ N}$$

Zatížení ozubeného kola 3a4 při sousledných otáčkách

$$F_{t3,4} = \frac{2 \cdot M_{k4}}{d_4} = \frac{2 \cdot 20,08}{0,056} = 717,14 \text{ N}$$

Zatížení ozubeného kola 4a7 při nesousledných otáčkách

$$F_{t4,7} = \frac{2 \cdot M_{k4}}{d_4} = \frac{2 \cdot 13,96}{0,056} = 498,57 \text{ N}$$

Zatížení ozubeného kola 1a5 při nesousledných otáčkách

$$F_{t1,5} = \frac{2 \cdot M_{k1}}{d_1} = \frac{2 \cdot 1,75}{0,016} = 218,75 \text{ N}$$

Zatížení ozubeného kola 5a6 při nesousledných otáčkách

$$F_{t5,6} = \frac{2 \cdot M_{k5}}{d_5} = \frac{2 \cdot 1,75}{0,016} = 218,75 \text{ N}$$

3.1.2 Síla radiální

Obecný vzorec: $F_{rx,y} = F_{tx,y} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}$ (33)

Zatížení ozubeného kola 1a2 při sousledných otáčkách

$$F_{r1,2} = F_{t1,2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} = 218,75 \cdot \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\cos 0^\circ} = 79,62 \text{ N}$$

Zatížení ozubeného kola 3a4 při sousledných otáčkách

$$F_{r3,4} = F_{t3,4} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} = 717,14 \cdot \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\cos 0^\circ} = 261,02 \text{ N}$$

Zatížení ozubeného kola 1a5 při nesousledných otáčkách

$$F_{r1,5} = F_{t1,5} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} = 218,75 \cdot \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\cos 0^\circ} = 79,62 \text{ N}$$

Zatížení ozubeného kola 5a6 při nesousledných otáčkách

$$F_{r5,6} = F_{t5,6} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} = 218,75 \cdot \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\cos 0^\circ} = 79,62 \text{ N}$$

Zatížení ozubeného kola 4a7 při nesousledných otáčkách

$$F_{r4,7} = F_{t4,7} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} = 498,57 \cdot \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\cos 0^\circ} = 181,46 \text{ N}$$

3.2 Kontaktní únavové poškození boků zubů – pitting

$$\text{Obecný vzorec: } \sigma_{Hx,y} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F_{tx,y} \cdot E_r}{b_x \cdot \rho_{rx,y}}} \quad (34)$$

Kontaktní únavové poškození mezi koly 1 a 2

$$\sigma_{H1,2} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F_{t1,2} \cdot E_r}{b_1 \cdot \rho_{r1,2}}} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{218,75 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{12 \cdot 2,04}} = 572,6 \text{ MPa}$$

Kontaktní únavové poškození mezi koly 3 a 4

$$\sigma_{H3,4} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F_{t3,4} \cdot E_r}{b_2 \cdot \rho_{r3,4}}} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{717,14 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{20 \cdot 1,96}} = 819,3 \text{ MPa}$$

Kontaktní únavové poškození mezi koly 1 a 5

$$\sigma_{H1,5} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F_{t1,5} \cdot E_r}{b_1 \cdot \rho_{r1,5}}} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{218,75 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{12 \cdot 1,37}} = 698,73 \text{ MPa}$$

Kontaktní únavové poškození mezi koly 5 a 6

$$\sigma_{H5,6} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F_{t5,6} \cdot E_r}{b_1 \cdot \rho_{r5,6}}} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{218,75 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{12 \cdot 2,02}} = 575,43 \text{ MPa}$$

Kontaktní únavové poškození mezi koly 4 a 7

$$\sigma_{H4,7} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F_{t4,7} \cdot E_r}{b_2 \cdot \rho_{r4,7}}} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{498,57 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{20 \cdot 2,51}} = 603,7 \text{ MPa}$$

Podmínka

$$\begin{aligned} \sigma_H &< \sigma_{Hlim} \\ 819,3 &< 1140 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \end{aligned} \quad (35)$$

3.2.1 Redukovaný modul pružnosti

$$E_r = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} = \frac{8,82 \cdot 10^{10}}{4,2 \cdot 10^5} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa} \quad (36)$$

3.2.2 Redukovaný poloměr křivosti

$$\text{Obecný vzorec: } \rho_{rx,y} = \frac{\rho_x \cdot \rho_y}{\rho_x + \rho_y} \quad (37)$$

Redukovaný poloměr mezi koly 1 a 2

$$\rho_{r1,2} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} = \frac{2,73 \cdot 8,05}{2,73 + 8,05} = 2,04 \text{ mm}$$

Redukovaný poloměr mezi koly 3 a 4

$$\rho_{r3,4} = \frac{\rho_3 \cdot \rho_4}{\rho_3 + \rho_4} = \frac{2,46 \cdot 9,56}{2,46 + 9,56} = 1,96 \text{ mm}$$

Redukovaný poloměr mezi koly 1 a 5

$$\rho_{r1,5} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_5}{\rho_1 + \rho_5} = \frac{2,73 \cdot 2,73}{2,73 + 2,73} = 1,37 \text{ mm}$$

Redukovaný poloměr mezi koly 5 a 6

$$\rho_{r5,6} = \frac{\rho_5 \cdot \rho_6}{\rho_5 + \rho_6} = \frac{2,73 \cdot 7,78}{2,73 + 7,78} = 2,02 \text{ mm}$$

Redukovaný poloměr mezi koly 4 a 7

$$\rho_{r4,7} = \frac{\rho_4 \cdot \rho_7}{\rho_4 + \rho_7} = \frac{9,55 \cdot 3,41}{9,55 + 3,41} = 2,51 \text{ mm}$$

3.3 Pevnostní výpočet v ohybu**3.3.1 Jmenovité napětí v ohybu**

$$\text{Obecný vzorec: } \sigma_{FnX} = \frac{F_{tx,y}}{m \cdot b_x} \cdot Y_{Fx} \cdot Y_{\epsilon x,y} \quad (38)$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 1 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn1} = \frac{F_{t1,2}}{m \cdot b_1} \cdot Y_{F1} \cdot Y_{\epsilon 1,2} = \frac{218,75}{0,8 \cdot 12} \cdot 2,77 \cdot 0,602 = 38 \text{ MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 2 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn2} = \frac{F_{t1,2}}{m \cdot b_1} \cdot Y_{F2} \cdot Y_{\epsilon 1,2} = \frac{218,75}{0,8 \cdot 12} \cdot 3,27 \cdot 0,602 = 44,86 \text{ MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 3 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn3} = \frac{F_{t3,4}}{m \cdot b_2} \cdot Y_{F3} \cdot Y_{\epsilon 3,4} = \frac{717,14}{0,8 \cdot 20} \cdot 2,81 \cdot 0,602 = 75,82 \text{ MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 4 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn4} = \frac{F_{t3,4}}{m \cdot b_2} \cdot Y_{F4} \cdot Y_{\epsilon 3,4} = \frac{717,14}{0,8 \cdot 20} \cdot 2,19 \cdot 0,602 = 59,09 \text{ MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 5 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn5} = \frac{F_{t1,5}}{m \cdot b_1} \cdot Y_{F5} \cdot Y_{\epsilon 1,5} = \frac{218,75}{0,8 \cdot 12} \cdot 2,77 \cdot 0,65 = 41,03 \text{MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 1 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn1} = \frac{F_{t1,5}}{m \cdot b_1} \cdot Y_{F1} \cdot Y_{\epsilon 1,5} = \frac{218,75}{0,8 \cdot 12} \cdot 2,77 \cdot 0,65 = 41,03 \text{MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 5 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn5} = \frac{F_{t5,6}}{m \cdot b_1} \cdot Y_{F5} \cdot Y_{\epsilon 5,6} = \frac{218,75}{0,8 \cdot 12} \cdot 2,77 \cdot 0,602 = 38 \text{MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 6 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn6} = \frac{F_{t5,6}}{m \cdot b_1} \cdot Y_{F6} \cdot Y_{\epsilon 5,6} = \frac{218,75}{0,8 \cdot 12} \cdot 2,27 \cdot 0,602 = 31,14 \text{MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 4 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn4} = \frac{F_{t4,7}}{m \cdot b_2} \cdot Y_{F4} \cdot Y_{\epsilon 4,7} = \frac{498,57}{0,8 \cdot 20} \cdot 2,19 \cdot 0,59 = 40,26 \text{MPa}$$

Jmenovité napětí v ohybu na kole 7 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Fn7} = \frac{F_{t4,7}}{m \cdot b_2} \cdot Y_{F7} \cdot Y_{\epsilon 4,7} = \frac{498,57}{0,8 \cdot 20} \cdot 2,68 \cdot 0,59 = 49,27 \text{MPa}$$

Součinitel záběru profilu Y_ϵ

$$\text{Obecný vzorec: } Y_{\epsilon x,y} = \frac{1}{\epsilon_{\alpha x,y}} \quad (39)$$

Součinitel záběru mezi koly 1 a 2

$$Y_{\epsilon 1,2} = \frac{1}{\epsilon_{\alpha 1,2}} = \frac{1}{1,66} = 0,602$$

Součinitel záběru mezi koly 3 a 4

$$Y_{\epsilon 3,4} = \frac{1}{\epsilon_{\alpha 3,4}} = \frac{1}{1,66} = 0,602$$

Součinitel záběru mezi koly 1 a 5

$$Y_{\epsilon 1,5} = \frac{1}{\epsilon_{\alpha 1,5}} = \frac{1}{1,55} = 0,65$$

Součinitel záběru mezi koly 5 a 6

$$Y_{\epsilon 5,6} = \frac{1}{\epsilon_{\alpha 5,6}} = \frac{1}{1,66} = 0,602$$

Součinitel záběru mezi koly 4 a 7

$$Y_{\varepsilon 4,7} = \frac{1}{\varepsilon_{\alpha 4,7}} = \frac{1}{1,7} = 0,59$$

Součinitel tvaru zubu Y_F

Obecný vzorec: $Y_{Fx} = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot z_x + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot z_x^2$ (40)

Kolo 1

$$Y_{F1} = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot z_1 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot z_1^2 = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 20 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 20^2 = 2,77$$

Kolo 2

$$Y_{F2} = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot z_2 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot z_2^2 = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 59 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 59^2 = 3,27$$

Kolo 3

$$Y_{F3} = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot z_3 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot z_3^2 = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 18 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 18^2 = 2,81$$

Kolo 4

$$Y_{F4} = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot z_4 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot z_4^2 = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 70 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 70^2 = 2,19$$

Kolo 5

$$Y_{F5} = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot z_5 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot z_5^2 = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 20 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 20^2 = 2,77$$

Kolo 6

$$Y_{F6} = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot z_6 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot z_6^2 = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 57 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 57^2 = 2,27$$

Kolo 7

$$Y_{F7} = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot z_7 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot z_7^2 = 3,23 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 25 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 25^2 = 2,68$$

3.3.2 Srovnávací ohybové napětí v patě zubu σ_F

Obecný vzorec: $\sigma_{Fx} = \sigma_{Fn x} \cdot K_A \cdot K_{Vx,y} \cdot K_{F\alpha x,y} \cdot K_{F\beta x,y}$ (41)

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 1 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{F1} = \sigma_{Fn1} \cdot K_A \cdot K_{V1,2} \cdot K_{F\alpha 1,2} \cdot K_{F\beta 1,2} = 38 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,33 \cdot 1,12 = 74,3 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 2 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{F2} = \sigma_{Fn2} \cdot K_A \cdot K_{V1,2} \cdot K_{F\alpha 1,2} \cdot K_{F\beta 1,2} = 44,86 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,33 \cdot 1,12 = 87,7 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 3 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{F3} = \sigma_{Fn3} \cdot K_A \cdot K_{V3,4} \cdot K_{F\alpha 3,4} \cdot K_{F\beta 3,4} = 75,82 \cdot 1,25 \cdot 1,01 \cdot 1,33 \cdot 1,32 = 168,05 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 4 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{F4} = \sigma_{Fn4} \cdot K_A \cdot K_{V3,4} \cdot K_{F\alpha 3,4} \cdot K_{F\beta 3,4} = 59,09 \cdot 1,25 \cdot 1,01 \cdot 1,33 \cdot 1,32 = 130,97 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 1 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{F1} = \sigma_{Fn1} \cdot K_A \cdot K_{V1,5} \cdot K_{F\alpha1,5} \cdot K_{F\beta1,5} = 41,03 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,275 \cdot 1,12 = 76,9 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 5 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{F5} = \sigma_{Fn5} \cdot K_A \cdot K_{V1,5} \cdot K_{F\alpha1,5} \cdot K_{F\beta1,5} = 41,03 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,275 \cdot 1,12 = 76,9 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 5 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{F5} = \sigma_{Fn5} \cdot K_A \cdot K_{V5,6} \cdot K_{F\alpha5,6} \cdot K_{F\beta5,6} = 38 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,33 \cdot 1,12 = 74,3 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 6 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{F6} = \sigma_{Fn6} \cdot K_A \cdot K_{V5,6} \cdot K_{F\alpha5,6} \cdot K_{F\beta5,6} = 31,14 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,33 \cdot 1,12 = 60,88 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 7 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{F7} = \sigma_{Fn7} \cdot K_A \cdot K_{V4,7} \cdot K_{F\alpha4,7} \cdot K_{F\beta4,7} = 49,27 \cdot 1,25 \cdot 1,02 \cdot 1,35 \cdot 1,19 = 100,92 \text{ MPa}$$

Srovnávací ohybové napětí v patě zubu 4 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{F4} = \sigma_{Fn4} \cdot K_A \cdot K_{V4,7} \cdot K_{F\alpha4,7} \cdot K_{F\beta4,7} = 40,26 \cdot 1,25 \cdot 1,02 \cdot 1,35 \cdot 1,19 = 82,46 \text{ MPa}$$

Podmínka

$$\sigma_F < \sigma_{Flim} \quad (42)$$

$$168,05 < 390 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Provozní součinitel K_A

$K_A = 1,25$ – viz Tab.1

Tab.1

Dodávka energie hnacím strojem	Odběr energie hnaným strojem		
	Plynulý	S mírnými rázy	S velkými rázy
Plynulá	1,00	1,25	1,75
S mírnými rázy	1,25	1,50	2 a více
Se středními rázy	1,50	1,75	2,25 a více

Součinitel vnitřních sil

Hodnoty odečteny z přílohy 1. Stupeň přesnosti:7

$$\frac{v_1 \cdot z_1}{100} = \frac{2,51 \cdot 20}{100} = 0,5 \quad K_{v1,2} = 1,05 \quad K_{v1,5} = 1,05 \quad K_{v5,6} = 1,05 \quad (43)$$

$$\frac{v_3 \cdot z_3}{100} = \frac{0,58 \cdot 18}{100} = 0,1 \quad K_{v3,4} = 1,01$$

$$\frac{v_7 \cdot z_7}{100} = \frac{1,11 \cdot 25}{100} = 0,28 \quad K_{v4,7} = 1,02$$

Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů

Obecný vzorec: $K_{F\alpha x,y} = \frac{1 + \varepsilon_{\alpha x,y}}{2}$ (44)

Součinitel záběru zatížení mezi koly 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$K_{F\alpha 1,2} = \frac{1 + \varepsilon_{\alpha 1,2}}{2} = \frac{1 + 1,66}{2} = 1,33$$

Součinitel záběru zatížení mezi koly 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$K_{F\alpha 3,4} = \frac{1 + \varepsilon_{\alpha 3,4}}{2} = \frac{1 + 1,66}{2} = 1,33$$

Součinitel záběru zatížení mezi koly 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$K_{F\alpha 1,5} = \frac{1 + \varepsilon_{\alpha 1,5}}{2} = \frac{1 + 1,55}{2} = 1,275$$

Součinitel záběru zatížení mezi koly 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$K_{F\alpha 5,6} = \frac{1 + \varepsilon_{\alpha 5,6}}{2} = \frac{1 + 1,66}{2} = 1,33$$

Součinitel záběru zatížení mezi koly 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$K_{F\alpha 4,7} = \frac{1 + \varepsilon_{\alpha 4,7}}{2} = \frac{1 + 1,7}{2} = 1,35$$

Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů podél stykových čar

Obecný vzorec: $K_{F\beta x,y} = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{b_x}{d_x} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{b_x}{d_x} \right]^2$ (45)

Mezi koly 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$K_{F\beta 1,2} = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{b_1}{d_1} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{b_1}{d_1} \right]^2 = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{12}{16} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{12}{16} \right]^2 = 1,12$$

Mezi koly 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$K_{F\beta 3,4} = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{b_2}{d_3} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{b_2}{d_3} \right]^2 = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{20}{14,4} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{20}{14,4} \right]^2 = 1,32$$

Mezi koly 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$K_{F\beta 1,5} = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{b_1}{d_1} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{b_1}{d_1} \right]^2 = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{12}{16} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{12}{16} \right]^2 = 1,12$$

Mezi koly 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$K_{F\beta 5,6} = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{b_1}{d_5} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{b_1}{d_5} \right]^2 = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{12}{16} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{12}{16} \right]^2 = 1,12$$

Mezi koly 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$K_{F\beta 4,7} = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{b_2}{d_7} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{b_2}{d_7} \right]^2 = 0,96 + 0,164 \cdot \left[\frac{20}{20} \right] + 0,0703 \cdot \left[\frac{20}{20} \right]^2 = 1,19$$

3.3.3 Výpočet součinitele bezpečnosti na ohyb S_F

$$\text{Obecný vzorec: } S_{Fx} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{Sx} \cdot Y_X \cdot Y_{Nx}}{\sigma_{Fx}} \quad (46)$$

Na ozubeném kole 1 při sousledných otáčkách

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S1} \cdot Y_X \cdot Y_{N1}}{\sigma_{F1}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,85}{74,3} = 4,96$$

Na ozubeném kole 2 při sousledných otáčkách

$$S_{F2} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S2} \cdot Y_X \cdot Y_{N2}}{\sigma_{F2}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 0,99 \cdot 1 \cdot 0,9}{87,7} = 4,08$$

Na ozubeném kole 3 při sousledných otáčkách

$$S_{F3} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S3} \cdot Y_X \cdot Y_{N3}}{\sigma_{F3}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,9}{168,05} = 2,32$$

Na ozubeném kole 4 při sousledných otáčkách

$$S_{F4} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S4} \cdot Y_X \cdot Y_{N4}}{\sigma_{F4}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 0,97 \cdot 1 \cdot 0,94}{130,97} = 2,8$$

Na ozubeném kole 1 při nesousledných otáčkách

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S1} \cdot Y_X \cdot Y_{N1}}{\sigma_{F1}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,85}{76,9} = 4,8$$

Na ozubeném kole 5 při nesousledných otáčkách

$$S_{F5} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S5} \cdot Y_X \cdot Y_{N5}}{\sigma_{F5}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,85}{76,9} = 4,8$$

Na ozubeném kole 5 při nesousledných otáčkách

$$S_{F5} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S5} \cdot Y_X \cdot Y_{N5}}{\sigma_{F5}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,85}{74,3} = 4,96$$

Na ozubeném kole 6 při nesousledných otáčkách

$$S_{F6} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S6} \cdot Y_X \cdot Y_{N6}}{\sigma_{F6}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,89}{60,88} = 5,87$$

Na ozubeném kole 7 při nesousledných otáčkách

$$S_{F7} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S7} \cdot Y_X \cdot Y_{N7}}{\sigma_{F7}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 1,06 \cdot 1 \cdot 0,89}{100,92} = 3,76$$

Na ozubeném kole 4 při nesousledných otáčkách

$$S_{F4} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_R \cdot Y_{S4} \cdot Y_X \cdot Y_{N4}}{\sigma_{F4}} = \frac{390 \cdot 1,03 \cdot 0,97 \cdot 1 \cdot 0,93}{82,46} = 4,4$$

Podmínka

$$S_F > S_{Fmin} \quad (47)$$

2,32 > 1,5 ⇒ **VYHOVUJE**

Součinitel drsnosti přechodové plochy

Hodnota odečtena z přílohy 2.

$$Y_R = 1,03$$

Součinitel vrubu v oblasti paty zubu Y_S

$$\text{Obecný vzorec: } Y_{Sx} = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot z_x + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot z_x^2 \quad (48)$$

Pro kolo 1

$$Y_{S1} = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot z_1 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot z_1^2 = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot 20^2 = 1,08$$

Pro kolo 2

$$Y_{S2} = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot z_2 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot z_2^2 = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 59 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot 59^2 = 0,99$$

Pro kolo 3

$$Y_{S3} = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot z_3 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot z_3^2 = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 18 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot 18^2 = 1,08$$

Pro kolo 4

$$Y_{S4} = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot z_4 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot z_4^2 = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 70 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot 70^2 = 0,97$$

Pro kolo 5

$$Y_{S5} = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot z_5 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot z_5^2 = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot 20^2 = 1,08$$

Pro kolo 6

$$Y_{S6} = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot z_6 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot z_6^2 = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 57 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot 57^2 = 1$$

Pro kolo 7

$$Y_{S7} = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot z_7 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot z_7^2 = 1,125 - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 25 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot 25^2 = 1,06$$

Součinitel velikosti Y_X

Hodnota odečtena z přílohy 3.

$$Y_X = 1$$

Korekční součinitel na počet zátěžných cyklů Y_N

$$\text{Obecné vzorce: } N_x = 3600 \cdot L_h \cdot n_x \quad (49)$$

$$Y_{N_x} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log N_x)} \quad (50)$$

Pro kolo 1 při sousledných i nesousledných otáčkách

$$N_1 = 3600 \cdot L_h \cdot n_1 = 3600 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 50 = 3,6 \cdot 10^9$$

$$Y_{N1} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log N_1)} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log 3,6 \cdot 10^9)} = 0,85$$

Pro kolo 2 a 3 při sousledných otáčkách

$$N_{2,3} = 3600 \cdot L_h \cdot n_{2,3} = 3600 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 12,89 = 928,08 \cdot 10^6$$

$$Y_{N_{2,3}} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log N_{2,3})} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log 928,08 \cdot 10^6)} = 0,9$$

Pro kolo 4 při sousledných otáčkách

$$N_4 = 3600 \cdot L_h \cdot n_4 = 3600 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 4,3 = 309,6 \cdot 10^6$$

$$Y_{N4} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log N_4)} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log 309,6 \cdot 10^6)} = 0,94$$

Pro kolo 4 při nesousledných otáčkách

$$N_4 = 3600 \cdot L_h \cdot n_4 = 3600 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 6,24 = 449,28 \cdot 10^6$$

$$Y_{N4} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log N_4)} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log 449,28 \cdot 10^6)} = 0,93$$

Pro kolo 5 při nesousledných otáčkách

$$N_5 = 3600 \cdot L_h \cdot n_5 = 3600 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 50 = 3,6 \cdot 10^9$$

$$Y_{N5} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log N_5)} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log 3,6 \cdot 10^9)} = 0,85$$

Pro kolo 6 a 7 při nesousledných otáčkách

$$N_{6,7} = 3600 \cdot L_h \cdot n_{6,7} = 3600 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 17,73 = 1,27 \cdot 10^9$$

$$Y_{N_{6,7}} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log N_{6,7})} = 10^{(0,324 - 0,0412 \cdot \log 1,27 \cdot 10^9)} = 0,89$$

3.4 Pevnostní výpočet v dotyku

3.4.1 Jmenovité kontaktní napětí

$$\text{Obecný vzorec: } \sigma_{H_{n,x,y}} = \sqrt{\frac{F_{tx,y}}{d_x \cdot b_x} \cdot \frac{u_{x,y} + 1}{u_{x,y}}} \cdot Z_M \cdot Z_H \cdot Z_{\epsilon_{x,y}} \quad (51)$$

Pro ozubená kola 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{Hn1,2} = \sqrt{\frac{F_{t1,2}}{d_1 \cdot b_1} \cdot \frac{u_{1,2} + 1}{u_{1,2}}} \cdot Z_M \cdot Z_H \cdot Z_{\varepsilon 1,2} = \sqrt{\frac{218,75}{16 \cdot 12} \cdot \frac{2,95 + 1}{2,95}} \cdot 190 \cdot 1,92 \cdot 0,78 = 351,45 \text{ MPa}$$

Pro ozubená kola 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{Hn3,4} = \sqrt{\frac{F_{t3,4}}{d_3 \cdot b_2} \cdot \frac{u_{3,4} + 1}{u_{3,4}}} \cdot Z_M \cdot Z_H \cdot Z_{\varepsilon 3,4} = \sqrt{\frac{717,14}{14,4 \cdot 20} \cdot \frac{3,89 + 1}{3,89}} \cdot 190 \cdot 1,92 \cdot 0,78 = 503,43 \text{ MPa}$$

Pro ozubená kola 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Hn1,5} = \sqrt{\frac{F_{t1,5}}{d_1 \cdot b_1} \cdot \frac{u_{1,5} + 1}{u_{1,5}}} \cdot Z_M \cdot Z_H \cdot Z_{\varepsilon 1,5} = \sqrt{\frac{218,75}{16 \cdot 12} \cdot \frac{1 + 1}{1}} \cdot 190 \cdot 1,92 \cdot 0,8 = 440,54 \text{ MPa}$$

Pro ozubená kola 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Hn5,6} = \sqrt{\frac{F_{t5,6}}{d_5 \cdot b_1} \cdot \frac{u_{5,6} + 1}{u_{5,6}}} \cdot Z_M \cdot Z_H \cdot Z_{\varepsilon 5,6} = \sqrt{\frac{218,75}{16 \cdot 12} \cdot \frac{2,85 + 1}{2,85}} \cdot 190 \cdot 1,92 \cdot 0,78 = 353,01 \text{ MPa}$$

Pro ozubená kola 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{Hn4,7} = \sqrt{\frac{F_{t4,7}}{d_7 \cdot b_2} \cdot \frac{u_{4,7} + 1}{u_{4,7}}} \cdot Z_M \cdot Z_H \cdot Z_{\varepsilon 4,7} = \sqrt{\frac{498,57}{20 \cdot 20} \cdot \frac{2,8 + 1}{2,8}} \cdot 190 \cdot 1,92 \cdot 0,77 = 365,34 \text{ MPa}$$

Součinitel materiálu Z_M

Hodnota je zjištěna z použité literatury [2].

$$Z_M = 190 \text{ MPa}$$

Součinitel tvaru zubu Z_H

Pro převodovku s přímými zuby se úhel $\beta = 0$.

$$Z_H = 1,92 - 0,0134 \cdot \beta + 5 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2 = 1,92 \quad (52)$$

Součinitel součtové délky stykových čar boků zubů Z_ε

$$\text{Obecný vzorec: } Z_{\varepsilon x,y} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\alpha x,y}}} \quad (53)$$

Pro kola 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$Z_{\varepsilon 1,2} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\alpha 1,2}}} = \sqrt{\frac{1}{1,66}} = 0,78$$

Pro kola 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$Z_{\varepsilon 3,4} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\alpha 3,4}}} = \sqrt{\frac{1}{1,66}} = 0,78$$

Pro kola 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$Z_{\varepsilon 1,5} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\alpha 1,5}}} = \sqrt{\frac{1}{1,55}} = 0,8$$

Pro kola 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$Z_{\varepsilon 5,6} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\alpha 5,6}}} = \sqrt{\frac{1}{1,66}} = 0,78$$

Pro kola 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$Z_{\varepsilon 4,7} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\alpha 4,7}}} = \sqrt{\frac{1}{1,7}} = 0,77$$

3.4.2 Srovnávací kontaktní napětí ve valivém bodě

$$\text{Obecný vzorec: } \sigma_{Hx,y} = \sigma_{Hnx,y} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_{vx,y} \cdot K_{H\beta x,y} \cdot K_{H\alpha x,y}} \quad (54)$$

Pro kola 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{H1,2} = \sigma_{Hn1,2} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_{v1,2} \cdot K_{H\beta 1,2} \cdot K_{H\alpha 1,2}} = 351,45 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,08 \cdot 1,32} = 480,74 \text{ MPa}$$

Pro kola 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$\sigma_{H3,4} = \sigma_{Hn3,4} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_{v3,4} \cdot K_{H\beta 3,4} \cdot K_{H\alpha 3,4}} = 503,43 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 1,01 \cdot 1,21 \cdot 1,32} = 714,88 \text{ MPa}$$

Pro kola 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{H1,5} = \sigma_{Hn1,5} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_{v1,5} \cdot K_{H\beta 1,5} \cdot K_{H\alpha 1,5}} = 440,54 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,08 \cdot 1,28} = 593,41 \text{ MPa}$$

Pro kola 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{H5,6} = \sigma_{Hn5,6} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_{v5,6} \cdot K_{H\beta 5,6} \cdot K_{H\alpha 5,6}} = 353,01 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 1,05 \cdot 1,08 \cdot 1,32} = 482,88 \text{ MPa}$$

Pro kola 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$\sigma_{H4,7} = \sigma_{Hn4,7} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_{v4,7} \cdot K_{H\beta 4,7} \cdot K_{H\alpha 4,7}} = 365,34 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 1,02 \cdot 1,13 \cdot 1,34} = 507,63 \text{ MPa}$$

Podmínka

$$\sigma_H < \sigma_{Hlim} \quad (55)$$

$$714,88 < 1140 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů $K_{H\alpha}$

$$\text{Obecný vzorec: } K_{H\alpha x,y} = \frac{1 + Z_{\varepsilon x,y}^2}{2 \cdot Z_{\varepsilon x,y}^2} \quad (56)$$

Pro kola 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$K_{H\alpha 1,2} = \frac{1 + Z_{\epsilon 1,2}^2}{2 \cdot Z_{\epsilon 1,2}^2} = \frac{1 + 0,78^2}{2 \cdot 0,78^2} = 1,32$$

Pro kola 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$K_{H\alpha 3,4} = \frac{1 + Z_{\epsilon 3,4}^2}{2 \cdot Z_{\epsilon 3,4}^2} = \frac{1 + 0,78^2}{2 \cdot 0,78^2} = 1,32$$

Pro kola 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$K_{H\alpha 1,5} = \frac{1 + Z_{\epsilon 1,5}^2}{2 \cdot Z_{\epsilon 1,5}^2} = \frac{1 + 0,8^2}{2 \cdot 0,8^2} = 1,28$$

Pro kola 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$K_{H\alpha 5,6} = \frac{1 + Z_{\epsilon 5,6}^2}{2 \cdot Z_{\epsilon 5,6}^2} = \frac{1 + 0,78^2}{2 \cdot 0,78^2} = 1,32$$

Pro kola 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$K_{H\alpha 4,7} = \frac{1 + Z_{\epsilon 4,7}^2}{2 \cdot Z_{\epsilon 4,7}^2} = \frac{1 + 0,77^2}{2 \cdot 0,77^2} = 1,34$$

Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů podél stykových čar $K_{H\beta}$

Obecný vzorec: $K_{H\beta x,y} = 0,33 + 0,67 \cdot K_{F\beta x,y}$ (57)

Pro kola 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$K_{H\beta 1,2} = 0,33 + 0,67 \cdot K_{F\beta 1,2} = 0,33 + 0,67 \cdot 1,12 = 1,08$$

Pro kola 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$K_{H\beta 3,4} = 0,33 + 0,67 \cdot K_{F\beta 3,4} = 0,33 + 0,67 \cdot 1,32 = 1,21$$

Pro kola 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$K_{H\beta 1,5} = 0,33 + 0,67 \cdot K_{F\beta 1,5} = 0,33 + 0,67 \cdot 1,12 = 1,08$$

Pro kola 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$K_{H\beta 5,6} = 0,33 + 0,67 \cdot K_{F\beta 5,6} = 0,33 + 0,67 \cdot 1,12 = 1,08$$

Pro kola 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$K_{H\beta 4,7} = 0,33 + 0,67 \cdot K_{F\beta 4,7} = 0,33 + 0,67 \cdot 1,19 = 1,13$$

3.4.3 Součinitel bezpečnosti v dotyku S_H

Obecný vzorec: $S_{Hx,y} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_{Rx,y} \cdot Z_{Xx} \cdot Z_{Nx}}{\sigma_{Hx,y}}$ (58)

Pro kola 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$S_{H1,2} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_{R1,2} \cdot Z_{X1} \cdot Z_{N1}}{\sigma_{H1,2}} = \frac{1140 \cdot 0,9 \cdot 1,08 \cdot 1,42 \cdot 1,022 \cdot 0,75}{480,74} = 2,51$$

Pro kola 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$S_{H3,4} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_{R3,4} \cdot Z_{X3} \cdot Z_{N3}}{\sigma_{H3,4}} = \frac{1140 \cdot 0,9 \cdot 1,08 \cdot 1,42 \cdot 1,022 \cdot 0,88}{714,88} = 1,98$$

Pro kola 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$S_{H1,5} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_{R1,5} \cdot Z_{X1} \cdot Z_{N1}}{\sigma_{H1,5}} = \frac{1140 \cdot 0,9 \cdot 1,08 \cdot 1,45 \cdot 1,022 \cdot 0,75}{593,41} = 2,08$$

Pro kola 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$S_{H5,6} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_{R5,6} \cdot Z_{X5} \cdot Z_{N6}}{\sigma_{H5,6}} = \frac{1140 \cdot 0,9 \cdot 1,08 \cdot 1,42 \cdot 1,022 \cdot 0,8}{482,88} = 2,66$$

Pro kola 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$S_{H4,7} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_{R4,7} \cdot Z_{X7} \cdot Z_{N7}}{\sigma_{H4,7}} = \frac{1140 \cdot 0,9 \cdot 1,08 \cdot 1,41 \cdot 1,022 \cdot 0,8}{507,63} = 2,52$$

Podmínka

$$S_H > S_{Hmin} \quad (59)$$

$$1,98 > 1,5 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Součinitel počtu zátěžných cyklů Z_N

$$\text{Obecná vzorec: } Z_{Nx} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log N_x)} \quad (60)$$

Pro ozubené kolo 1

$$Z_{N1} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log N_1)} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log 3,6 \cdot 10^9)} = 0,75$$

Pro ozubené kolo 2

$$Z_{N2} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log N_2)} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log 928,08 \cdot 10^6)} = 0,82$$

Pro ozubené kolo 3

$$Z_{N3} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log N_3)} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log 928,08 \cdot 10^6)} = 0,82$$

Pro ozubené kolo 4 při sousledných otáčkách

$$Z_{N4} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log N_4)} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log 309,6 \cdot 10^6)} = 0,88$$

Pro ozubené kolo 4 při nesousledných otáčkách

$$Z_{N4} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log N_4)} = 10^{(0,518 - 0,0673 \cdot \log 449,28 \cdot 10^6)} = 0,86$$

Pro ozubené kolo 5

$$Z_{N5} = 10^{(0,518-0,0673 \cdot \log N_5)} = 10^{(0,518-0,0673 \cdot \log 3,6 \cdot 10^9)} = 0,75$$

Pro ozubené kolo 6

$$Z_{N6} = 10^{(0,518-0,0673 \cdot \log N_6)} = 10^{(0,518-0,0673 \cdot \log 1,27 \cdot 10^9)} = 0,8$$

Pro ozubené kolo 7

$$Z_{N7} = 10^{(0,518-0,0673 \cdot \log N_7)} = 10^{(0,518-0,0673 \cdot \log 1,27 \cdot 10^9)} = 0,8$$

Součinitel maziva Z_L

$$Z_L = 0,402 + \frac{2,39}{(1,2 + 80/v_{50})^2} = 0,402 + \frac{2,39}{(1,2 + 80/80)^2} = 0,9 \quad (61)$$

Součinitel obvodové rychlosti Z_v

$$Z_v = 0,66 + 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_{H \lim} + \frac{0,7 - 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_{H \lim}}{\sqrt{0,8 + 32/v}} = 0,66 + 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 1140 +$$

$$\frac{0,7 - 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot 1140}{\sqrt{0,8 + 32/80}} = 1,08 \quad (62)$$

Součinitel drsnosti povrchu Z_R

$$\text{Obecný vzorec: } Z_{R,x,y} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{a_{x,y}} \cdot (\bar{R}_{mx} + \bar{R}_{my}) \right]^k} \quad (63)$$

Pro kola 1 a 2 při sousledných otáčkách

$$Z_{R1,2} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{a_{1,2}} \cdot (\bar{R}_{m1} + \bar{R}_{m2}) \right]^k} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{31,6} \cdot (0,8 + 0,8) \right]^{0,092}} = 1,42$$

Pro kola 3 a 4 při sousledných otáčkách

$$Z_{R3,4} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{a_{3,4}} \cdot (\bar{R}_{m3} + \bar{R}_{m4}) \right]^k} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{35,2} \cdot (0,8 + 0,8) \right]^{0,092}} = 1,42$$

Pro kola 1 a 5 při nesousledných otáčkách

$$Z_{R1,5} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{a_{1,5}} \cdot (\bar{R}_{m1} + \bar{R}_{m5}) \right]^k} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{16} \cdot (0,8 + 0,8) \right]^{0,092}} = 1,45$$

Pro kola 5 a 6 při nesousledných otáčkách

$$Z_{R5,6} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{a_{5,6} \cdot (\overline{R}_{m5} + \overline{R}_{m6})} \right]^x} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{30,8 \cdot (0,8 + 0,8)} \right]^{0,092}} = 1,42$$

Pro kola 4 a 7 při nesousledných otáčkách

$$Z_{R4,7} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{a_{4,7} \cdot (\overline{R}_{m4} + \overline{R}_{m7})} \right]^x} = \frac{1,65}{\left[\sqrt[3]{38 \cdot (0,8 + 0,8)} \right]^{0,092}} = 1,41$$

Součinitel velikosti Z_x

$$\text{Obecný vzorec: } Z_{xx} = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot d_x - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot d_x^2 \quad (64)$$

Pro ozubené kolo 1

$$Z_{x1} = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot d_1 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot d_1^2 = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 16 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot 16^2 = 1,022$$

Pro ozubené kolo 2

$$Z_{x2} = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot d_2 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot d_2^2 = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 47,2 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot 47,2^2 = 1,021$$

Pro ozubené kolo 3

$$Z_{x3} = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot d_3 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot d_3^2 = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 14,4 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot 14,4^2 = 1,022$$

Pro ozubené kolo 4

$$Z_{x4} = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot d_4 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot d_4^2 = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 56 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot 56^2 = 1,021$$

Pro ozubené kolo 5

$$Z_{x5} = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot d_5 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot d_5^2 = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 16 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot 16^2 = 1,022$$

Pro ozubené kolo 6

$$Z_{x6} = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot d_6 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot d_6^2 = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 45,6 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot 45,6^2 = 1,021$$

Pro ozubené kolo 7

$$Z_{x7} = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot d_7 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot d_7^2 = 1,023 - 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 20 - 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot 20^2 = 1,022$$

4 Návrh průměru výstupního hřídele

$$\tau = (15 - 35) \text{MPa}$$

$$d' = 0,932 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n_4 \cdot [\tau]}} = 0,932 \cdot \sqrt[3]{\frac{550}{4,36 \cdot 30 \cdot 10^6}} = 0,015 \text{m} = 15 \text{mm} \quad (65)$$

$$t = 1,1 \text{mm}$$

$$d = d' + t = 15 + 3,5 = 18,5 \text{mm} \quad (66)$$

Zaokrouhleně volím $d = 22 \text{mm}$

4.1 Volba materiálu

Volím materiál povrchově kalený 12 051 ze skript [2].

Mez únavy v ohybu: $\sigma_{Fc} = 390\text{MPa}$

Mez únavy v dotyku: $\sigma_{Hc} = 1140\text{MPa}$

Mez pevnosti v tahu: $R_m = 640\text{MPa}$

Mez kluzu v tahu: $R_e = 390\text{MPa}$

Tvrdość zubu v jádře: $J_{HV} = 200$

Tvrdość zubu na boku: $V_{HV} = 600 - 675$

4.2 Výpočet ohybového momentu

Ohybový moment v radiálním směru

$$M_{or} = F_{r4} \cdot \frac{L_1 \cdot L_2}{L} = 261,02 \cdot \frac{32 \cdot 31}{63} = 4110,03\text{Nmm} \quad (67)$$

Ohybový moment v tangenciálním směru

$$M_{ot} = F_{t4} \cdot \frac{L_1 \cdot L_2}{L} = 717,14 \cdot \frac{32 \cdot 31}{63} = 11292,1\text{Nmm} \quad (68)$$

Celkový ohybový moment

$$M_o = \sqrt{M_{or}^2 + M_{ot}^2} = \sqrt{4110,03^2 + 11292,1^2} = 12016,82\text{Nmm} \quad (69)$$

4.3 Výpočet napětí v jednotlivých průřezích

Hodnoty M_o jsou zjištěny lineárním přístupem. Polohy řezů v příloze 6.

$$\text{Obecné vzorce: } W_K = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (70)$$

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_K} \quad (71)$$

$$W_O = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (72)$$

$$\sigma_O = \frac{M_O}{W_O} \quad (73)$$

Řez A

$$M_K^A = 20080\text{Nmm}$$

$$W_K^A = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 18,5^3}{16} = 1243,21\text{mm}^3$$

$$\tau_K^A = \frac{M_K^A}{W_K^A} = \frac{20080}{1243,21} = 16,15\text{MPa}$$

Řez B

$$M_K^B = 20080 \text{ Nmm}$$

$$W_K^B = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 22^3}{16} = 2090,73 \text{ mm}^3$$

$$\tau_K^B = \frac{M_K^B}{W_K^B} = \frac{20080}{2090,73} = 9,6 \text{ MPa}$$

Řez C

$$M_K^C = 20080 \text{ Nmm}$$

$$W_K^C = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 25^3}{16} = 3067,96 \text{ mm}^3$$

$$\tau_K^C = \frac{M_K^C}{W_K^C} = \frac{20080}{3067,96} = 6,55 \text{ MPa}$$

$$M_O^C = 2325,84 \text{ Nmm}$$

$$W_O^C = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 25^3}{32} = 1533,98 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_O^C = \frac{M_O^C}{W_O^C} = \frac{2325,84}{1533,98} = 1,52 \text{ MPa}$$

Řez D

$$M_K^D = 20080 \text{ Nmm}$$

$$W_K^D = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 30^3}{16} = 5301,44 \text{ mm}^3$$

$$\tau_K^D = \frac{M_K^D}{W_K^D} = \frac{20080}{5301,44} = 3,79 \text{ MPa}$$

$$M_O^D = 8140,43 \text{ Nmm}$$

$$W_O^D = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 30^3}{32} = 2650,72 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_O^D = \frac{M_O^D}{W_O^D} = \frac{8140,43}{2650,72} = 3,07 \text{ MPa}$$

Řez E

$$M_K^E = 20080 \text{ Nmm}$$

$$W_K^E = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 54^3}{16} = 30918 \text{ mm}^3$$

$$\tau_K^E = \frac{M_K^E}{W_K^E} = \frac{20080}{30918} = 0,65 \text{ MPa}$$

$$M_O^E = 12016,82 \text{ Nmm}$$

$$W_O^E = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 54^3}{32} = 15459 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_O^E = \frac{M_O^E}{W_O^E} = \frac{12016,82}{15459} = 0,78 \text{ MPa}$$

Řez F

$$M_O^F = 8261,56 \text{ Nmm}$$

$$W_O^F = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 15^3}{32} = 331,34 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_O^F = \frac{M_O^F}{W_O^F} = \frac{8261,56}{331,34} = 24,93 \text{ MPa}$$

Řez G

$$M_O^G = 2065,39 \text{ Nmm}$$

$$W_O^G = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 8^3}{32} = 50,27 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_O^G = \frac{M_O^G}{W_O^G} = \frac{2065,39}{50,27} = 41,09 \text{ MPa}$$

4.3.1 Kontrolní výpočet – statický přístup

Hodnota koeficientu α_K je odečtena z přílohy 4 a hodnota α_O z přílohy 5.

$$\text{Obecné vzorce: } \frac{R}{d} \quad (74)$$

$$\frac{D}{d} \quad (75)$$

$$\tau = \alpha_K \cdot \tau_K \quad (76)$$

$$\sigma_{RED} = \sqrt{(\alpha_O \cdot \sigma_O)^2 + 3 \cdot (\alpha_K \cdot \tau_K)^2} \quad (77)$$

Řez A

$$\text{Empirický vztah: } \alpha_K^A = 2 + 0,05 \cdot \frac{b}{R} = 2 + 0,05 \cdot \frac{6}{0,4} = 2,75 \quad (78)$$

$$\tau^A = \alpha_K^A \cdot \tau_K^A = 2,75 \cdot 16,15 = 44,41 \text{ MPa}$$

Řez B

$$\frac{R}{d} = \frac{1}{22} = 0,045$$

$$\frac{D}{d} = \frac{25}{22} = 1,136 \quad \alpha_K^B = 1,55$$

$$\tau^B = \alpha_K^B \cdot \tau_K^B = 1,55 \cdot 9,6 = 14,88 \text{ MPa}$$

Řez C

$$\frac{R}{d} = \frac{0,5}{25} = 0,02$$

$$\frac{D}{d} = \frac{30}{25} = 1,2 \quad \alpha_K^C = 1,9$$

$$\alpha_O^C = 2,3$$

$$\sigma_{RED}^C = \sqrt{(\alpha_O^C \cdot \sigma_O^C)^2 + 3 \cdot (\alpha_K^C \cdot \tau_K^C)^2} = \sqrt{(2,3 \cdot 1,6)^2 + 3 \cdot (1,9 \cdot 6,55)^2} = 21,87 \text{MPa}$$

Řez D

$$\frac{R}{d} = \frac{1,5}{30} = 0,05$$

$$\frac{D}{d} = \frac{54}{30} = 1,8 \quad \alpha_K^D = 1,7$$

$$\alpha_O^D = 1,9$$

$$\sigma_{RED}^D = \sqrt{(\alpha_O^D \cdot \sigma_O^D)^2 + 3 \cdot (\alpha_K^D \cdot \tau_K^D)^2} = \sqrt{(1,9 \cdot 3,25)^2 + 3 \cdot (1,7 \cdot 3,79)^2} = 12,75 \text{MPa}$$

Řez E

$$\alpha_K^E = 1$$

$$\alpha_O^E = 1$$

$$\sigma_{RED}^E = \sqrt{(\alpha_O^E \cdot \sigma_O^E)^2 + 3 \cdot (\alpha_K^E \cdot \tau_K^E)^2} = \sqrt{(1 \cdot 0,82)^2 + 3 \cdot (1 \cdot 0,65)^2} = 1,94 \text{MPa}$$

Řez F

$$\frac{R}{d} = \frac{0,5}{15} = 0,033$$

$$\frac{D}{d} = \frac{54}{15} = 3,6 \quad \alpha_O^F = 2,45$$

$$\sigma_{RED}^F = \sqrt{(\alpha_O^F \cdot \sigma_O^F)^2} = \sqrt{(2,45 \cdot 24,93)^2} = 61,08 \text{MPa}$$

Řez G

$$\frac{R}{d} = \frac{1,5}{8} = 0,19$$

$$\frac{D}{d} = \frac{15}{8} = 1,88 \quad \alpha_O^G = 1,35$$

$$\sigma_{RED}^G = \sqrt{(\alpha_O^G \cdot \sigma_O^G)^2} = \sqrt{(1,35 \cdot 41,09)^2} = 55,47 \text{MPa}$$

Podmínka

Bylo zjištěno, že největší napětí je v řezu F, je dále vyžadováno, aby bezpečnost k_E byla 2,5. Podle zvoleného materiálu 12 051 je tabulková hodnota meze kluzu v tahu $R_E = 390 \text{MPa}$.

$$k_E \cdot \sigma_{RED} \leq R_E \quad (79)$$

$$2,5 \cdot 61,08 \leq R_E$$

$$152,7 < R_E \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

4.4 Reakce v podporách

Pro hřídel 4

Obecné vzorce: $R_{rx} = F_{rx,y} \cdot \frac{L_x}{L}$ (80)

$$R_{tx} = F_{tx,y} \cdot \frac{L_x}{L} \quad (81)$$

$$R_x = \sqrt{R_{rx}^2 + R_{tx}^2} \quad (82)$$

Reakce 1 na hřídeli 4 v radiálním směru

$$R_{r1} = F_{r3,4} \cdot \frac{L_2}{L} = 261,02 \cdot \frac{31}{63} = 128,44 \text{ N}$$

Reakce 2 na hřídeli 4 v radiálním směru

$$R_{r2} = F_{r3,4} \cdot \frac{L_1}{L} = 261,02 \cdot \frac{32}{63} = 132,58 \text{ N}$$

Reakce 1 na hřídeli 4 v tangenciálním směru

$$R_{t1} = F_{t3,4} \cdot \frac{L_2}{L} = 717,14 \cdot \frac{31}{63} = 352,88 \text{ N}$$

Reakce 2 na hřídeli 4 v tangenciálním směru

$$R_{t2} = F_{t3,4} \cdot \frac{L_1}{L} = 717,14 \cdot \frac{32}{63} = 364,26 \text{ N}$$

Celková reakce 1 na hřídeli 4

$$R_1 = \sqrt{R_{r1}^2 + R_{t1}^2} = \sqrt{128,44^2 + 352,88^2} = 375,53 \text{ N}$$

Celková reakce 2 na hřídeli 4

$$R_2 = \sqrt{R_{r2}^2 + R_{t2}^2} = \sqrt{132,58^2 + 364,26^2} = 387,64 \text{ N}$$

4.5 Torzní tuhost hřídele

Viz. příloha 7.

Obecné vzorce: $\varphi_x = \frac{M_{kx} \cdot l_x}{G \cdot J_{px}}$ (83)

$$J_{px} = \frac{\pi \cdot d_x^4}{32} \quad (84)$$

Pro hřídel 4 při sousledných otáčkách

$$\varphi_1 = \frac{M_{k4} \cdot l_1}{G \cdot J_{p1}} = \frac{20080 \cdot 15}{8 \cdot 10^4 \cdot 79521,56} = 0,000047 \text{ rad}$$

$$\varphi_2 = \frac{M_{k4} \cdot l_2}{G \cdot J_{p2}} = \frac{20080 \cdot 12}{8 \cdot 10^4 \cdot 38349,52} = 0,00008 \text{ rad}$$

$$\varphi_3 = \frac{M_{k4} \cdot l_3}{G \cdot J_{p3}} = \frac{20080 \cdot 1,3}{8 \cdot 10^4 \cdot 32032,55} = 0,00001 \text{ rad}$$

$$\varphi_4 = \frac{M_{k4} \cdot l_4}{G \cdot J_{p2}} = \frac{20080 \cdot 2,2}{8 \cdot 10^4 \cdot 38349,52} = 0,000014 \text{ rad}$$

$$\varphi_5 = \frac{M_{k4} \cdot l_5}{G \cdot J_{p4}} = \frac{20080 \cdot 9}{8 \cdot 10^4 \cdot 22998,03} = 0,0001 \text{ rad}$$

$$J_{p1} = \frac{\pi \cdot d_1^4}{32} = \frac{\pi \cdot 30^4}{32} = 79521,56 \text{ mm}^4$$

$$J_{p2} = \frac{\pi \cdot d_2^4}{32} = \frac{\pi \cdot 25^4}{32} = 38349,52 \text{ mm}^4$$

$$J_{p3} = \frac{\pi \cdot d_3^4}{32} = \frac{\pi \cdot 23,9^4}{32} = 32032,55 \text{ mm}^4$$

$$J_{p4} = \frac{\pi \cdot d_4^4}{32} = \frac{\pi \cdot 22^4}{32} = 22998,03 \text{ mm}^4$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5 = 0,000047 + 0,00008 + 0,00001 + 0,000014 + 0,0001 = 0,000251 \text{ rad} \quad (85)$$

$$\varphi^\circ = \frac{180}{\pi} \cdot \varphi = \frac{180}{\pi} \cdot 0,000251 = 0,014^\circ \quad \text{VYHOVUJE} \quad (86)$$

5 Výpočet ložisek

Ložisko 1 při sousledných otáčkách

Typ	C(N)	C _O (N)	F _a (N)	F _r (N)	e(-)	X(-)	Y(-)	p(-)	P(N)	n(ot/min)
HK0810	3950	3800	0	261,02	0	1	0	3	261,02	376,2

$$L_h = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \Rightarrow C = P \cdot \sqrt[p]{\frac{60 \cdot n \cdot L_h}{10^6}} \quad (87)$$

$$C = P \cdot \sqrt[p]{\frac{60 \cdot n \cdot L_h}{10^6}} = 261,02 \cdot \sqrt[3]{\frac{60 \cdot 376,2 \cdot 2 \cdot 10^4}{10^6}} = 2002,35 \text{ N} \quad (88)$$

Vypočtená hodnota C je několikanásobně menší než katalogová hodnota použitého ložiska => **VYHOVUJE.**

Ložisko 2 při sousledných otáčkách

Typ	C(N)	C ₀ (N)	F _a (N)	F _r (N)	e(-)	X(-)	Y(-)	p(-)	P(N)	n(ot/min)
6005	10000	5850	0	261,02	0	1	0	3	261,02	376,2

$$L_h = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \Rightarrow C = P \cdot \sqrt[p]{\frac{60 \cdot n \cdot L_h}{10^6}} \quad (89)$$

$$C = P \cdot \sqrt[p]{\frac{60 \cdot n \cdot L_h}{10^6}} = 261,02 \cdot \sqrt[3]{\frac{60 \cdot 376,2 \cdot 2 \cdot 10^4}{10^6}} = 2002,35 \text{ N} \quad (90)$$

Vypočtená hodnota C je několikanásobně menší než katalogová hodnota použitého ložiska => **VYHOVUJE.**

6 Výpočet pera

Pero na výstupním hřídeli

$$F = \frac{M_K}{\frac{d}{2}} = \frac{20080}{\frac{22}{2}} = 1825,45 \text{ N} \quad (91)$$

$$p_{\text{dov}} = 100 \text{ MPa}$$

$$t = 4,1 \text{ mm}$$

$$l = \frac{F}{t \cdot p_{\text{dov}}} = \frac{1825,45}{3,5 \cdot 100} = 5,22 \text{ mm} \quad (92)$$

Já volím L=28mm

7 Závěr

Výpočty, které byly provedeny nám dokázaly, že takto navržená převodovka bude optimálně fungovat v rozmezí otáček, které byly stanoveny v zadání. Jak je z výše vypočtených výsledků patrné bude dodržena i životnost převodovky.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] SVOBODA, P., Základy konstruování: výběr z norem pro konstrukční cvičení. CERM, s.r.o., 2001. 288 s. ISBN 80-7204-214-9
- [2] VÁVRA, P., Strojnické tabulky. ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7
- [3] KLIMEŠ, P., Části a mechanismy strojů: konstrukční návrh převodovky. CERM, s.r.o., 2003. 58 s. ISBN 80-214-2420-6
- [4] SCHAEFFLER CZ s.r.o. – firemní stránky [online]. [cit. 2008-04-18]. URL: <<http://www.inaloziska.cz>>

9 Seznam symbolů a jednotek

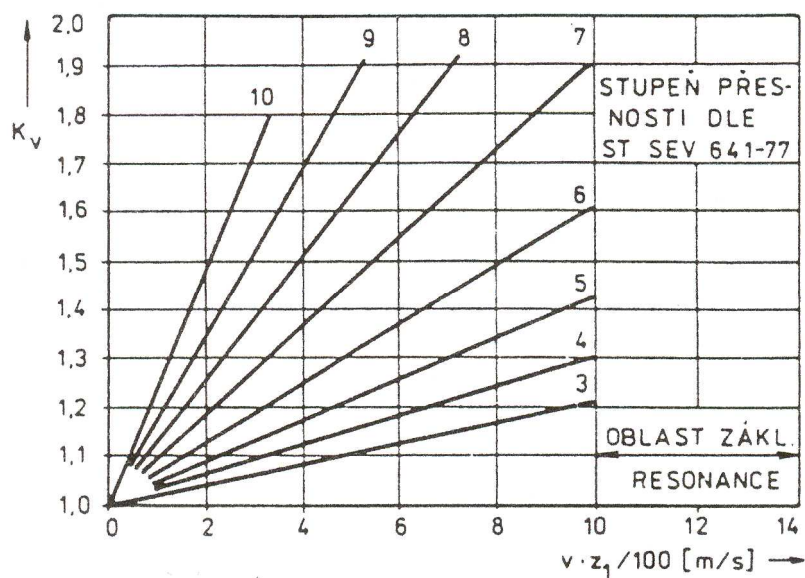
Značka	Název	Jednotka
u_p	Výsledný převodový poměr	-
u	Převodový poměr skutečný	-
u	Převodový poměr navržený	-
z	Počet zubů kola	-
L_h	Životnost	hod
u	Zadaný převodový poměr	-
n	Otáčky ozubeného kola	ot/s
M_K	Kroutící moment na hřídeli	N.m
m	Modul ozubených kol	mm
d	Průměr roztečných kružnic	mm
d_a	Průměr hlavových kružnic	mm
d_f	Průměr patních kružnic	mm
d_b	Průměr základních kružnic	mm
a	Osová vzdálenost	mm
h_a	Výška hlavy zubu	mm
h_f	Výška paty zubu	mm
h	Výška zubu	mm
b	Šířka zubu	mm
ϵ_α	Součinitel záběru profilu	-
F_t	Zatížení v tečném směru	N
E	Modul pružnosti	MPa
E_r	Redukovaný modul pružnosti	MPa
ρ	Poloměr křivosti	mm
ρ_r	Redukovaný poloměr křivosti	mm
σ_H	Výpočtové napětí v dotyku	MPa
Y_ϵ	Součinitel záběru profilu	-
Y_F	Součinitel tvaru zubu	-
σ_{Fn}	Jmenovité napětí v ohybu	MPa
K_A	Provozní součinitel	-
K_v	Součinitel vnitřních sil	-
$K_{F\alpha}$	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů	-
$K_{F\beta}$	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů podél stykových čar	-
σ_F	Srovnávací ohybové napětí v patě zubu	MPa
S_F	Součinitel bezpečnosti na ohyb	-
Y_R	Součinitel drsnosti přechodové plochy	-
Y_S	Součinitel vrubu v oblasti paty zubu	-
Y_X	Součinitel velikosti	-
Y_N	Korekční součinitel počtu zátěžných cyklů	-
σ_{Hn}	Jmenovité kontaktní napětí	MPa
Z_M	Součinitel materiálu	-
Z_H	Součinitel tvaru zubu	-
Z_ϵ	Součinitel součtové délky stykových čar boků zubů	-
σ_H	Srovnávací kontaktní napětí ve valivém bodě	MPa
$K_{H\alpha}$	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů	-
$K_{H\beta}$	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů podél stykových čar	-
S_H	Součinitel bezpečnosti v dotyku	-
Z_N	Součinitel počtu zátěžných cyklů	-
Z_L	Součinitel maziva	-
Z_v	Součinitel obvodové rychlosti	-
Z_R	Součinitel drsnosti povrchu	-

Z_x	Součinitel velikosti	-
τ	Dovolené napětí v krutu	MPa
P	Výkon	kW
t	Hloubka drážky v hřídeli	mm
d'	Průměr hřídele	mm
d	Průměr hřídele s přičtením hloubky drážky	mm
F_R	Radiální síla	N
R_r	Reakce v podporách v radiálním směru	N
R_t	Reakce v podporách v tangenciálním směru	N
R	Reakce v podporách	N
σ_{Fc}	Mez únavy v ohybu	MPa
σ_{Hc}	Mez únavy v dotyku	MPa
R_m	Mez pevnosti v tahu	MPa
R_e	Mez kluzu v tahu	MPa
J_{HV}	Tvrдость zubu v jádře	
V_{HV}	Tvrдость zubu na boku	
M_{or}	Ohybový moment v radiálním směru	Nmm
M_{ot}	Ohybový moment v tangenciálním směru	Nmm
M_o	Celkový ohybový moment	Nmm
W_K	Kruhový průřez	mm ³
W_o	Kruhový průřez	mm ³
σ_o	Napětí v ohybu	MPa
M_K	Kroutící moment	Nmm
σ_{RED}	Redukované napětí	MPa
α_K	Součinitel pro krut	-
α_o	Součinitel pro ohyb	-
k_E	Míra bezpečnosti	-
J	Kvadratický moment průřezu	mm ⁴
φ	Torzní tuhost hřídele	rad
φ°	Torzní tuhost hřídele	°
J_p	Polární kvadratický moment hřídele	mm ⁴
G	Modul pružnosti materiálu ve smyku	MPa
c	Bachova konstanta	MPa
ψ	Relativní šířka ozubení	-

10 Přílohy

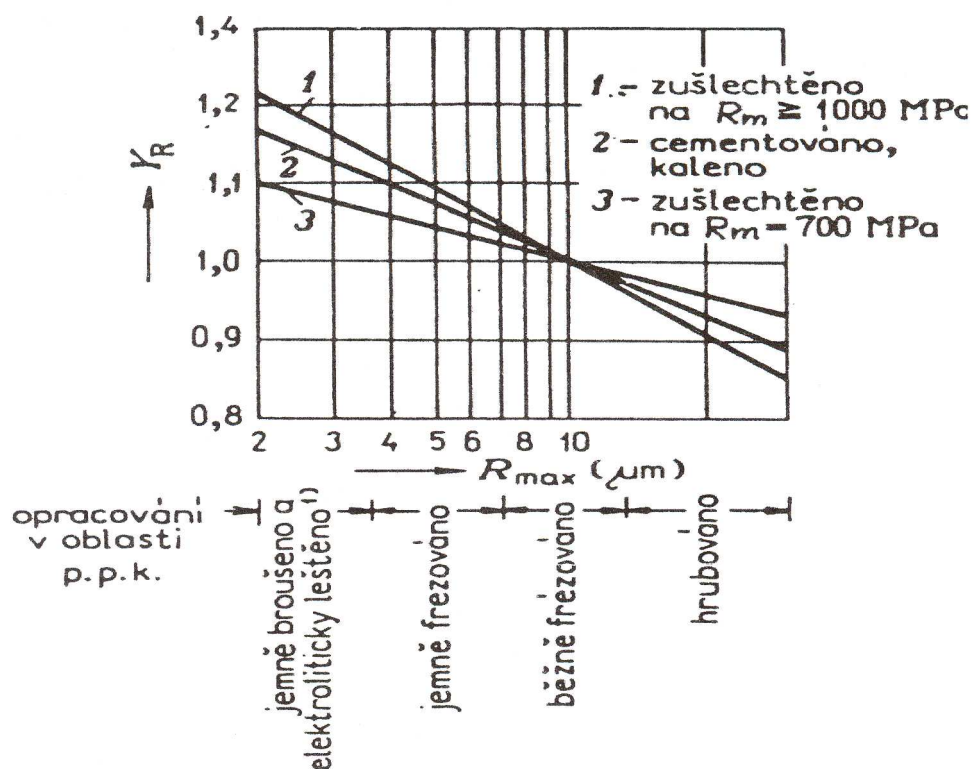
Příloha 1

Součinitel KV čelního soukolí s přímými zuby



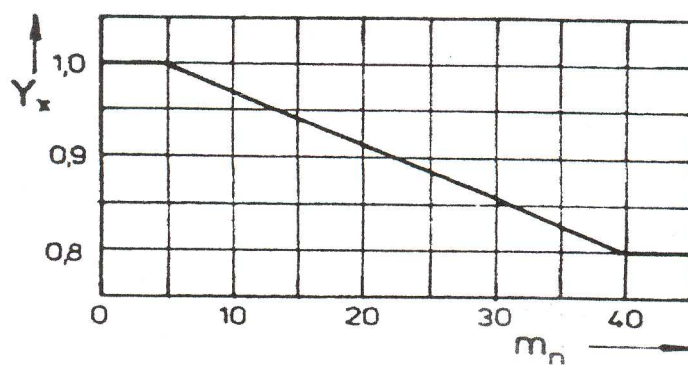
Příloha 2

Součinitel drsnosti patní přechodové křivky Y_R



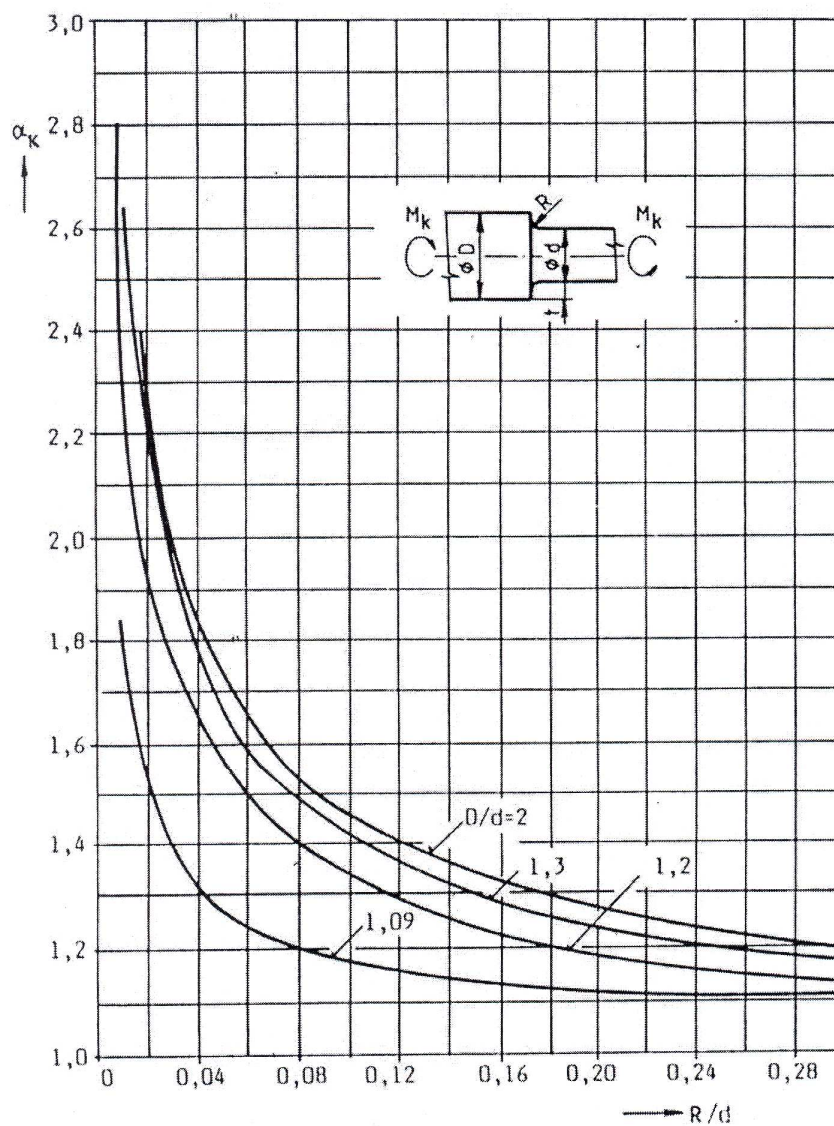
Příloha 3

Součinitel velikosti Y_X



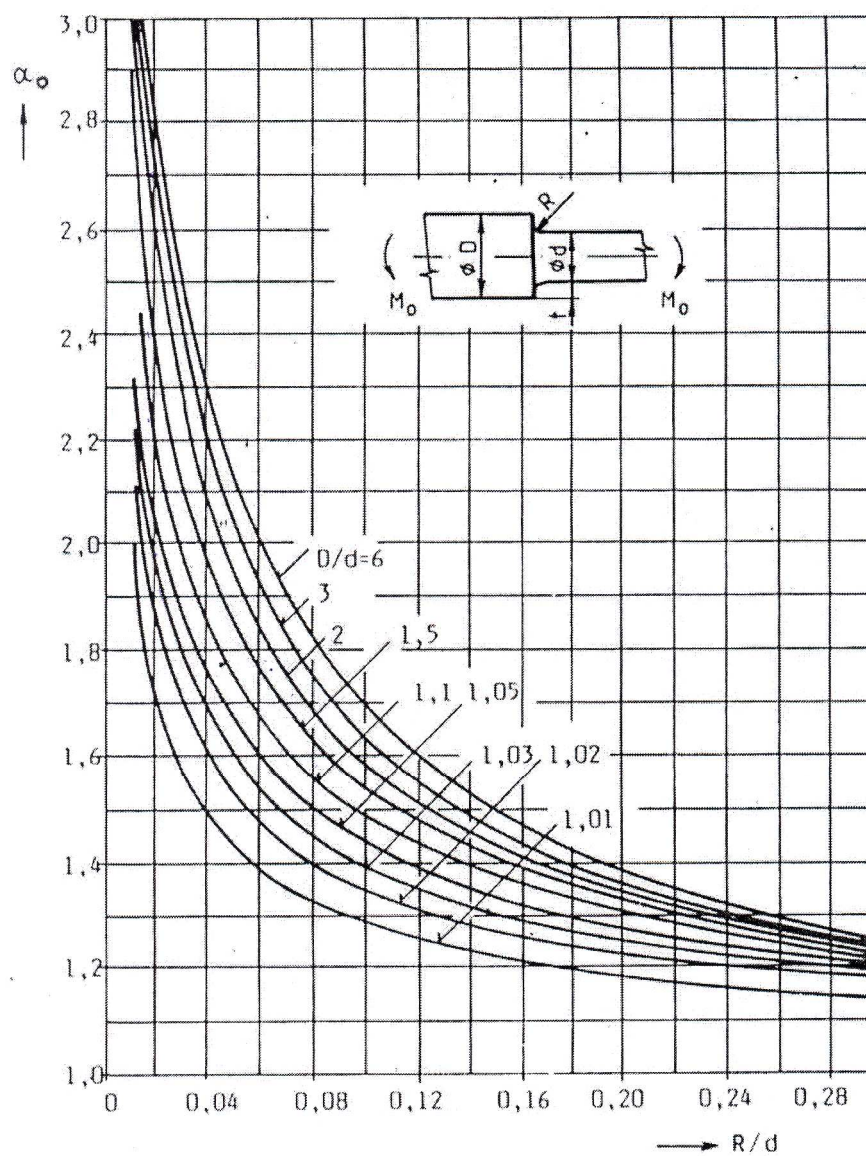
Příloha 4

Součinitel pro krut α_K



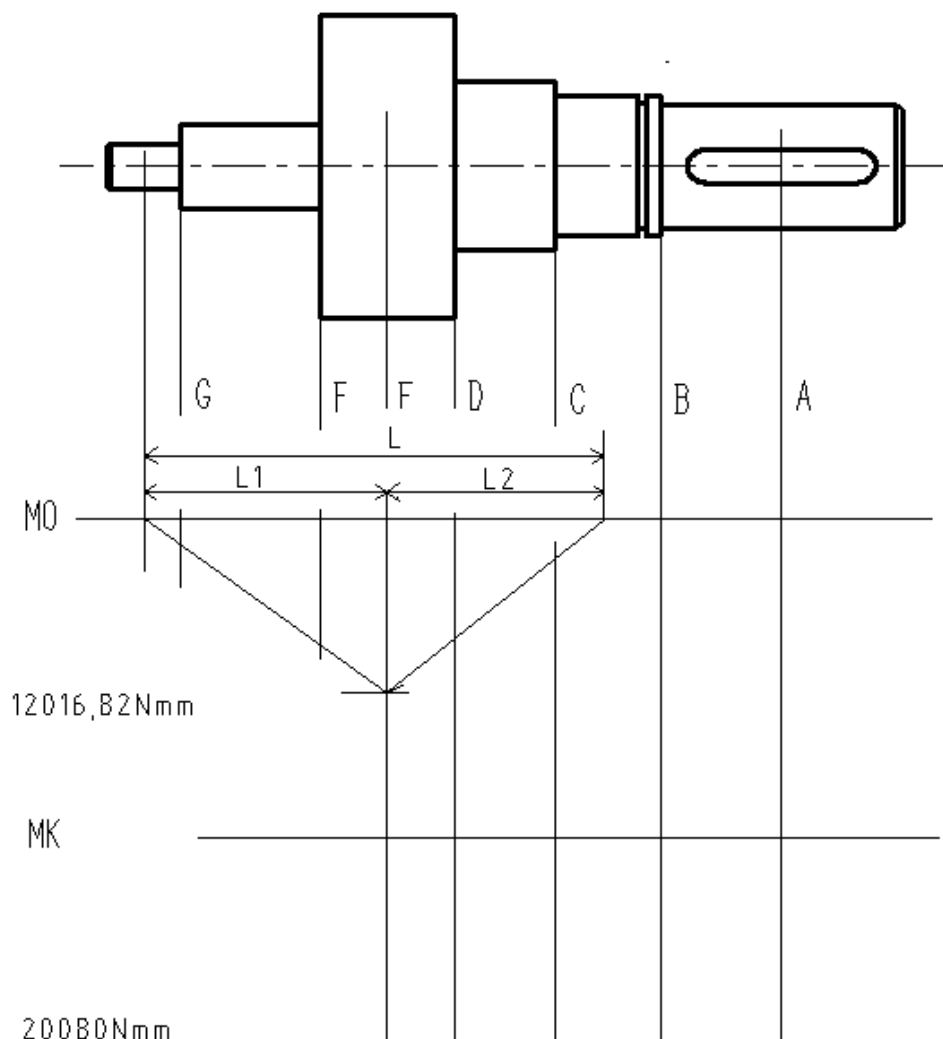
Příloha 5

Součinitel pro ohyb α_o



Příloha 6

Poloha řezů na výstupní hřídeli



Příloha 7

