

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**TROSTUPANJSKI REDUKTOR SA KOAKSIJALNIM
IZLAZNIM VRATILIMA**

Rijeka, rujan 2022.

Josip Murgić

0069083159

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**TROSTUPANJSKI REDUKTOR SA KOAKSIJALNIM
IZLAZNIM VRATILIMA**

Mentor: doc.dr.sc Željko Vrcan

Rijeka, rujan 2022.

Josip Murgić

0069083159

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 10. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**
Predmet: **Elementi strojeva II**
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Josip Murgić (0069083159)**
Studij: **Preddiplomski stručni studij strojarstva**

Zadatak: **Trostupanjski reduktor s koaksijalnim izlaznim vratilima / Three stage reduction gear with coaxial output shafts**

Opis zadatka:

Projektirati trostupanjski horizontalni reduktor za primjenu u industriji, s kosim ozubljenjem i dva koaksijalna izlazna vratila. Broj okretaja ulaznog vratila iznosi 2980 min⁻¹. Prijenosni omjer na prvom izlaznom vratilu iznosi $i = 72$, a priključena snaga $P = 180$ kW. Prijenosni omjer na drugom izlaznom vratilu iznosi $i = 54$, a priključena snaga $P = 160$ kW. Trajnost ležajeva iznosi minimalno 12000 sati. Temperatura okoline iznosi najviše 30°C. Proračunati sve bitne elemente reduktora, izabrati ulje za podmazivanje, odrediti potreban način podmazivanja zupčanika i ležajeva te način hlađenja ulja. Izraditi sklopni nacrt reduktora i radioničke nacрте u dogovoru s mentorom. U radu navesti upotrijebljenu literaturu.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

J. Murgić

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:



Doc. dr. sc. Željko Vrcan

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Robert Basan

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod nazivom Trostupanjski reduktor s koaksijalnim izlaznim vratilima, pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Željko Vrcan.

Rijeka, rujan 2022.

Josip Murgić

0069083159

SADRŽAJ

1. UVOD	6
2. ODREĐIVANJE OSNOVNIH PARAMETARA REDUKTORA.....	7
2.1. Parametri zadani zadatkom	7
2.2. Određivanje prijenosnog omjera	7
2.3. Određivanje brzine vrtnje	7
2.4. Određivanje snage i momenata.....	9
3. PRORAČUN PRVOG STUPNJA REDUKTORA.....	12
3.1. Projektni proračun za prvi stupanj reduktora.....	12
3.1.1. Razmak osi zupčastog para	12
3.1.2. Izbor modula.....	13
3.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika	13
3.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika.....	13
3.1.5. Točan prijenosni omjer.....	14
3.1.6. Diobeni promjeri	14
3.1.7. Teoretski razmak osi.....	15
3.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika	15
3.1.9. Stupanj prekrivanja profila	15
3.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	15
3.1.11. Suma faktora pomaka profila	16
3.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku	17
3.1.13. Promjeri preko korijena zuba.....	18
3.1.14. Promjeri preko glave zuba	18
3.1.15. Promjeri temeljnih krugova.....	18
3.1.16. Promjeri pogonskih krugova.....	19
3.1.17. Stupanj prekrivanja profila	19
3.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku.....	20
3.2. Kontrolni proračun za prvi stupanj reduktora.....	22
3.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika.....	22
3.2.2. Sigurnost na pitting.....	23
3.2.3. Nosivost korijena zuba.....	24
3.2.4. Sigurnost protiv loma.....	25

3.3. Izbor ulja za podmazivanje	27
3.3.1. Stribeckov pritisak	27
4. PRORAČUN DRUGOG STUPNJA REDUKTORA	28
4.1. Projektni proračun za drugi stupanj reduktora	28
4.1.1. Razmak osi zupčastog para	28
4.1.2. Izbor modula.....	29
4.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika	29
4.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika.....	29
4.1.5. Točan prijenosni omjer	30
4.1.6. Diobeni promjeri	30
4.1.7. Teoretski razmak osi	30
4.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika	31
4.1.9. Stupanj prekrivanja profila	31
4.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	31
4.1.11. Suma faktora pomaka profila	32
4.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku	32
4.1.13. Promjeri preko korijena zuba.....	33
4.1.14. Promjeri preko glave zuba	34
4.1.15. Promjeri temeljnih krugova.....	34
4.1.16. Promjeri pogonskih krugova.....	34
4.1.17. Stupanj prekrivanja profila	35
4.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku.....	35
4.2. Kontrolni proračun za drugi stupanj reduktora.....	38
4.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika.....	38
4.2.2. Sigurnost na pitting.....	39
4.2.3. Nosivost korijena zuba.....	40
4.2.4. Sigurnost protiv loma.....	41
4.3. Izbor ulja za podmazivanje	43
4.3.1. Stribeckov pritisak	43
5. PRORAČUN TREĆEG STUPNJA REDUKTORA	44
5.1. Projektni proračun za treći stupanj reduktora.....	44
5.1.1. Razmak osi zupčastog para	44
5.1.2. Izbor modula.....	45

5.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika	45
5.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika.....	45
5.1.5. Točan prijenosni omjer.....	46
5.1.6. Diobeni promjeri	46
5.1.7. Teoretski razmak osi	46
5.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika	47
5.1.9. Stupanj prekrivanja profila	47
5.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	47
5.1.11. Suma faktora pomaka profila	48
5.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku	48
5.1.13. Promjeri preko korijena zuba.....	49
5.1.14. Promjeri preko glave zuba	50
5.1.15. Promjeri temeljnih krugova.....	50
5.1.16. Promjeri pogonskih krugova.....	51
5.1.17. Stupanj prekrivanja profila	51
5.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku.....	51
5.2. Kontrolni proračun za treći stupanj reduktora	54
5.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika.....	54
5.2.2. Sigurnost na pitting.....	55
5.2.3. Nosivost korijena zuba.....	56
5.2.4. Sigurnost protiv loma.....	57
5.3. Izbor ulja za podmazivanje	59
5.3.1. Stribeckov pritisak	59
6. PRORAČUN TREĆEG STUPNJA REDUKTORA (MANJI PRIJENOSNI OMJER)	60
6.1. Projektni proračun za treći stupanj reduktora (manji prijenosni omjer).....	60
6.1.1. Razmak osi zupčastog para	60
6.1.2. Izbor modula.....	61
6.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika	61
6.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika.....	61
6.1.5. Točan prijenosni omjer.....	62
6.1.6. Diobeni promjeri	62
6.1.7. Teoretski razmak osi	63

6.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika	63
6.1.9. Stupanj prekrivanja profila	63
6.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	63
6.1.11. Suma faktora pomaka profila	64
6.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku	65
6.1.13. Promjeri preko korijena zuba.....	66
6.1.14. Promjeri preko glave zuba	66
6.1.15. Promjeri temeljnih krugova	66
6.1.16. Promjeri pogonskih krugova.....	67
6.1.17. Stupanj prekrivanja profila	67
6.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku	68
6.2. Kontrolni proračun za treći stupanj reduktora (manji prijenosni omjer)	70
6.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika.....	70
6.2.2. Sigurnost na pitting.....	71
6.2.3. Nosivost korijena zuba.....	72
6.2.4. Sigurnost protiv loma.....	73
6.3. Izbor ulja za podmazivanje	75
6.3.1. Stribeckov pritisak	75
6.3.2. Sustav za podmazivanje i hlađenje reduktora.....	75
7. IZBOR LEŽAJA I PROMJER VRATILA	76
7.1. Vratilo 1.....	76
7.2. Vratilo 2.....	79
7.3. Vratilo 3.....	82
7.4. Vratilo 4.....	85
7.5. Vratilo 5.....	88
8. Izbor pera.....	91
8.1. Vratilo 1.....	91
8.2. Vratilo 2.....	92
8.3. Vratilo 3.....	93
8.4. Vratilo 4.....	94
8.5. Vratilo 5.....	95
9. Postupak konstruiranja reduktora.....	96
10. Zaključak	97

11. Popis literature	98
12. Sažetak.....	99
12. Summary.....	100
13. Prilozi.....	101

1. UVOD

Reduktor ili zupčasti prijenosnik je mehanički prijenosnik snage koji se sastoji od jednog ili više parova zupčanika, smještenih u kućištu, čija je osnovna uloga smanjivanje broja okretaja pogonskog stroja na broj okretaja radnog stroja, a ujedno i povećanje momenta tog istog radnog stroja. Prijenos snage se ostvaruje pomoću zupčanika.

Reduktori su vrlo važni sklopovi kojima se posvećuje velika pažnja, jer su obavezni posrednici između pogonskog i radnog stroja i koriste se u svim granama industrije. Imamo više vrsta reduktora, a neka osnovna podjela je po broju stupnjeva: jednostupanjski reduktor, dvostupanjski reduktor ili više stupanjski reduktor. Taj broj stupnjeva nam govori koliko je zupčastih parova u zahvatu.

Vrlo važna karakteristika kod reduktora je prijenosni omjer koji možemo izraziti kao omjer brzine vrtnje pogonskog i gonjenog člana prijenosnika. Kod reduktora prijenosni omjer je uvijek veći od 1, a može biti konstantan kroz čitav sklop reduktora ili promjenjiv.

Prilikom odabira reduktora potrebno je obratiti pozornost na više faktora, a to su vrsta i tip reduktora, prijenosni omjer, okretni moment, snaga, dimenzije, opterećenje i dr. Zbog toga potrebno je dobro poznavanje i razumijevanje strojarske struke.



Slika 1.1. Dvostupanjski reduktor

2. ODREĐIVANJE OSNOVNIH PARAMETARA REDUKTORA

Prije započinjanja projektnog i kontrolnog proračuna reduktora, potrebno je odrediti osnovne parametre za sva 3 stupnja, koji su nam potrebni za proračune, a ti parametri su snaga, moment, broj okretaja i prijenosni omjeri.

2.1. Parametri zadani zadatkom

Snaga izlaznog vratila 1: $P_1 = 180 \text{ kW}$

Snaga izlaznog vratila 2: $P_2 = 160 \text{ kW}$

Prijenosni omjer na prvom izlaznom vratilu: $i_{z1} = 72$

Prijenosni omjer na drugom izlaznom vratilu: $i_{z2} = 54$

Ulazni broj okretaja: $n_1 = 2980 \text{ min}^{-1}$

Trajnost ležajeva: $L \geq 12000\text{h}$

Temperatura okoline: $T = 30 \text{ °C}$

Ozubljenje: Koso

2.2. Određivanje prijenosnog omjera

Pošto imamo dva prijenosna omjera $i_{z1} = 72$ i $i_{z2} = 54$, za dimenzioniranje zupčanika i proračun koristit ćemo veći, a prijenosni omjer ćemo dobiti razdiobom putem trećeg korijena ukupnog prijenosnog omjera, pa dobivamo da je prijenosni omjer jednak:

$$i_1 = i_2 = i_3 = \sqrt[3]{i_{z1}} = \sqrt[3]{72} = 4,16$$

Za 3. stupanj sa manjom izlaznom snagom, dobivamo da je prijenosni omjer jednak:

$$i_{3m} = \frac{i_{z2}}{i_l^2} = \frac{54}{4,16^2} = 3,12$$

2.3. Određivanje brzine vrtnje

Brzina vrtnje ulaznog vratila (pogonsko vrtilo 1.stupnja) nam iznosi:

$$n_1 = 2980 \text{ min}^{-1}$$

Gonjeno vratilo 1. stupnja:

$$n_2 = \frac{n_1}{i_1}$$

$$n_2 = \frac{2980}{4,16}$$

$$n_2 = 716,329 \text{ min}^{-1}$$

Brzine vrtnje gonjenog zupčanika 1. stupnja, jednaka je brzini vrtnje pogonskog zupčanika 2. stupnja, jer se oba zupčanika nalaze na istom vratilu.

Gonjeno vratilo 2. stupnja:

$$n_4 = \frac{n_3}{i_1}$$

$$n_4 = \frac{716,329}{4,16}$$

$$n_4 = 172,19 \text{ min}^{-1}$$

Brzina vrtnje pogonskog zupčanika 3. stupnja, jednaka je brzini vrtnje gonjenog zupčanika 2. stupnja, jer se nalaze na istom vratilu.

Gonjeno vratilo 3. stupnja sa većom snagom i momentom:

$$n_5 = \frac{n_4}{i_3}$$

$$n_5 = \frac{172,19}{4,16}$$

$$n_5 = 41,39 \text{ min}^{-1}$$

Gonjeno vratilo 3. stupnja sa manjom snagom i momentom:

$$n_6 = \frac{n_4}{i_{3m}}$$

$$n_6 = \frac{172,19}{3,12}$$

$$n_6 = 55,19 \text{ min}^{-1}$$

2.4. Određivanje snage i momenata

3. stupanj prijenosa (Veća snaga i prijenosni omjer)

Izlazna snaga:

$$P_6 = 180 \text{ kW}$$

Izlazni moment:

$$T_{IZL} = T_6 = \frac{P_6}{2\pi \cdot \frac{n_6}{60}}$$

$$T_6 = \frac{180 \cdot 10^3}{2\pi \cdot \frac{41,39}{60}}$$

$$T_6 = 41528,712 \text{ Nm}$$

Ulazna snaga:

$$P_4 = \frac{P_6}{\eta}$$

$$P_4 = \frac{180}{0,98}$$

$$P_4 = 183,67 \text{ kW}$$

Ulazni moment:

$$T_{UL} = T_4 = \frac{P_4}{2\pi \cdot \frac{n_4}{60}}$$

$$T_4 = \frac{183,67 \cdot 10^3}{2\pi \cdot \frac{172,19}{60}}$$

$$T_4 = 10185,95 \text{ Nm}$$

3. stupanj prijenosa (Manja snaga i prijenosni omjer)

Izlazna snaga:

$$P_5 = 160 \text{ kW}$$

Izlazni moment:

$$T_{IZL} = \frac{P_5}{2\pi \cdot \frac{n_5}{60}}$$

$$T_5 = \frac{160 \cdot 10^3}{2\pi \cdot \frac{55,19}{60}}$$

$$T_5 = 27684,64 \text{ Nm}$$

Ulazna snaga:

$$P_4' = \frac{P_5}{\eta}$$

$$P_4' = \frac{160}{0,98}$$

$$P_4' = 163,27 \text{ kW}$$

Ulazni moment:

$$T_{UL} = T_4' = \frac{P_4}{2\pi \cdot \frac{n_4}{60}}$$

$$T_4' = \frac{163,27 \cdot 10^3}{2\pi \cdot \frac{172,19}{60}}$$

$$T_4' = 9054,61 \text{ Nm}$$

Ukupna snaga prvog i drugog koaksijalnog izlaznog vratila:

$$P_{4uk} = P_4 + P_4' = 346,94 \text{ kW}$$

2.stupanj prijenosa

Izlazna snaga:

$$P_3 = P_{4uk} = 346,94 \text{ kW}$$

Izlazni moment:

$$T_3 = T_{4uk} = 19240,56 \text{ Nm}$$

Ulazna snaga:

$$P_2 = \frac{P_3}{\eta}$$

$$P_4 = \frac{346,94}{0,98}$$

$$P_4 = 354,02 \text{ kW}$$

Ulazni moment:

$$T_2 = \frac{P_2}{2\pi \cdot \frac{n_2}{60}}$$

$$T_2 = \frac{354,02 \cdot 10^3}{2\pi \cdot \frac{716,329}{60}}$$

$$T_2 = 4719,4 \text{ Nm}$$

1. stupanj prijenosa

Izlazna snaga:

$$P_2 = 354,02 \text{ kW}$$

Izlazni moment:

$$T_2 = 4719,4 \text{ Nm}$$

Ulazna snaga:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

$$P_1 = \frac{354,02}{0,98}$$

$$P_1 = 361,25 \text{ kW}$$

Ulazni moment:

$$T_1 = \frac{P_1}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60}}$$

$$T_1 = \frac{361,25 \cdot 10^3}{2\pi \cdot \frac{2960}{60}}$$

$$T_1 = 1157,6 \text{ Nm}$$

3. PRORAČUN PRVOG STUPNJA REDUKTORA

3.1. Projektni proračun za prvi stupanj reduktora

Materijal koji će se koristiti za izradu zupčanika je Č5420, koji ima sljedeće karakteristike:

- tvrdoća boka zuba: 61 HRC
- dinamička tvrdoća boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1490 \text{ N/mm}^2$
- dinamička tvrdoća korijena zuba: $\sigma_{Fe} = 920 \text{ N/mm}^2$
- toplinska obrada: cementacija + kaljenje

3.1.1. Razmak osi zupčastog para

Za poznati ulazni moment $T_1 = 1157,6 \text{ Nm}$ formula za izračun razmaka osi glasi:

$$a \geq K_2 (i_z + 1) \sqrt[3]{\frac{T_1}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_v \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \left(\frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hmin}} \right)^2}$$

Pri čemu je:

$$K_2 = 320$$

$$i_z = 4,16 - \text{prijenosni omjer}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \frac{i_z}{20} = 0,5 + \frac{4,16}{20} = 0,708 - \text{faktor širine zupčanika}$$

$$K_A = 1,5 - \text{faktor primjene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja}$$

$$K_v = 1,1 - \text{faktor dodatnih dinamičkih opterećenja}$$

$$H_{H\alpha} = 1,1 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu}$$

$$K_{H\beta} = 1,12 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž zuba}$$

$$S_{Hmin} = 1,1 - \text{minimalna sigurnost na pitting}$$

$$\sigma_{Hlim} = 1490 - \text{dinamička tvrdoća boka zuba}$$

Uvrštavanjem u formulu dobivamo da je razmak osi veći ili jednak:

$$a \geq 320(4,16+1) \sqrt[3]{\frac{1157,6}{0,708} \cdot \frac{4,16+1}{4,16} 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,12 \left(\frac{1,1}{1490}\right)^2}$$

$$a \geq 216,26988 \text{ mm}$$

Usvajamo standardni razmak osi:

$$a = 250 \text{ mm}$$

3.1.2. Izbor modula

Za kose zube sa tvrdim i cementiranim bokovima formula glasi:

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2}$$

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{250 \cdot 4,16}{(1+4,16)^2}$$

$$m_n = 3,906 \text{ mm}$$

Usvajamo standardnu vrijednost 1. prioriteta:

$$m_n = 4 \text{ mm}$$

3.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

Broj zubi dobivamo formulom:

$$z_1 = \frac{2a \cdot \cos \beta}{m(i_z+1)}$$

pri čemu je β nagib zuba i iznosi $\beta = 17^\circ$, pa dobivamo:

$$z_1 = \frac{2 \cdot 250 \cos 17^\circ}{4(4,16+1)}$$

$$z_1 = 23,166$$

$z_1 = 23$ – usvojen prvi manji cijeli broj

3.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = z_1 \cdot i_1$$

$$z_2 = 23 \cdot 4,16$$

$$z_2 = 95,68$$

$$z_2 = 95 - \text{usvojen cijeli broj}$$

3.1.5. Točan prijenosni omjer

Točan prijenosni omjer dobivamo formulom:

$$u = i = \frac{z_2}{z_1}$$

$$u = i = \frac{95}{23}$$

$$u = i = 4,13$$

Odstupanje od i_z dobivamo:

$$\Delta i = 1 - \frac{i_z}{i}$$

$$\Delta i = 1 - \frac{4,16}{4,13}$$

$$\Delta i = -0,00716 < 0,025$$

3.1.6. Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{4 \cdot 23}{\cos 17^\circ}$$

$$d_1 = 96,204 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta}$$

$$d_2 = \frac{4 \cdot 95}{\cos 17^\circ}$$

$$d_2 = 397,3623 \text{ mm}$$

3.1.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$a_d = \frac{96,204 + 397,3623}{2}$$

$$a_d = 246,7833 \text{ mm}$$

$$a_d < a, a - a_d = (0...5)$$

$$a - a_d = 250 - 246,7833 = 3,217 \text{ mm}$$

3.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1$$

$$b = b_2 = 0,708 \cdot 96,204$$

$$b = b_2 = 68,1121 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 68 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

$$b_1 = b_2 + (2...10)$$

$$b_1 = 68 + 6$$

$$b_1 = 74 \text{ mm}$$

3.1.9. Stupanj prekrivanja profila

Stupanj prekrivanja profila iznosi:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi \cdot m_n}$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{68 \sin 17^\circ}{\pi \cdot 4,16}$$

$$\varepsilon_\beta = 1,582$$

3.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

Zahvatni kut za kose zube iznosi:

za $\alpha_n = 20^\circ$,

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan\alpha_n}{\cos\beta}\right)$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan 20^\circ}{\cos 17^\circ}\right)$$

$$\alpha_t = 20,837^\circ$$

Pogonski zahvatni kut iznosi:

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos\alpha_t\right)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{246,783}{250} \cdot \cos 20,837^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 22,6952^\circ$$

3.1.11. Suma faktora pomaka profila

Vrijedi da je:

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2\tan\alpha_n} (z_1 + z_2) < 1,5$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan\alpha_{wt} - \frac{\pi\alpha_{wt}}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan 22,6952^\circ - \frac{\pi \cdot 22,6952^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0,0221045$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan\alpha_t - \frac{\pi\alpha_t}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan 20,837^\circ - \frac{\pi \cdot 20,837^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = 0,0169292$$

Suma faktora pomaka profila zatim iznosi:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,0221045 - 0,0169292}{2\tan 20^\circ} (23 + 95) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,8389 < 1,5$$

3.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku

Računa se prema formuli:

$$x_1 = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{[1 - (x_1 + x_2)] \ln u}{2 \ln \left(\frac{Z_{n1} Z_{n2}}{100} \right)}$$

Da bi izračunali x_1 , potrebno je izračunati ekvivalentan broj zuba za oba zupčanika, a koja se dobivaju formulama:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

uz uvjet da prvo moramo izračunati kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu prema formuli:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 17^\circ \cdot \cos 20^\circ)$$

$$\beta_b = 0,005$$

pa dobivamo da je:

$$Z_{n1} = \frac{23}{\cos^2 0,005 \cos 17^\circ}$$

$$Z_{n1} = 24,051$$

$$Z_{n2} = Z_{n1} \cdot u$$

$$Z_{n2} = 99,34$$

U konačnici dobivamo da je:

$$x_1 = \frac{0,8389}{2} + \frac{[1 - (0,8389)] \ln 4,13}{2 \ln \left(\frac{24,051 \cdot 99,34}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,4554$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1$$

$$x_2 = 0,3835$$

3.1.13. Promjeri preko korijena zuba

$$d_{f1} = m_n \left(\frac{z_1}{\cos\beta} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 4 \left(\frac{23}{\cos 17^\circ} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 89,847 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m_n \left(\frac{z_2}{\cos\beta} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 4 \left(\frac{95}{\cos 17^\circ} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 390,431 \text{ mm}$$

3.1.14. Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 250 - 390,431$$

$$d_{a1} = 107,569 \text{ mm, Usvajamo } d_{a1} = 107 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1}$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 250 - 89,847$$

$$d_{a2} = 408,153 \text{ mm, Usvajamo } d_{a2} = 408 \text{ mm}$$

3.1.15. Promjeri temeljnih krugova

$$d_{b1} = d_1 \cos\alpha_t$$

$$d_{b1} = 96,203 \cdot \cos 20,837^\circ$$

$$d_{b1} = 90,402 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos\alpha_t$$

$$d_{b2} = 397,363 \cdot \cos 20,837^\circ$$

$$d_{b2} = 373,399 \text{ mm}$$

3.1.16. Promjeri pogonskih krugova

$$d_{w1} = \frac{2a}{i_1 + 1}$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 250}{4,16 + 1}$$

$$d_{w1} = 97,458 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 2a - d_{w1}$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 250 - 155,556$$

$$d_{w2} = 402,542 \text{ mm}$$

3.1.17. Stupanj prekrivanja profila

Dobiva se prema formuli:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2a \sin \alpha_{wt}}{2\pi m_t \cdot \cos \alpha_t}$$

pri čemu je potrebno izračunati kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

$$m_t = \frac{4}{\cos 17^\circ}$$

pa dobivamo,

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{107^2 - 90,402^2} + \sqrt{408^2 - 373,399^2} - 2 \cdot 250 \cdot \sin 22,695^\circ}{2\pi \cdot 4,183 \cdot \cos 20,837^\circ}$$

$$\varepsilon_\alpha = 1,171 > 1,1 \text{ – za kose zube}$$

3.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Formula za debljinu vrha zuba za pogonski zupčanik:

$$S_{an1} = d_{a1} \left(\frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

Kut zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}}$$

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{90,402}{107,569}$$

$$\alpha_{at1} = 32,817^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{107}{96,203} \tan(17^\circ) \right)$$

$$\beta_{a1} = 18,873^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan 32,817^\circ - \frac{\pi \cdot 32,817^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = 0,072112$$

Pri čemu u konačnici slijedi da je debljina vrha zuba jednaka:

$$S_{an1} = 107 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,45545 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 23} + 0,016929 - 0,072112 \right) \cdot \cos 18,873^\circ$$

$$S_{an1} = 2,8689 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Formula za debljinu vrha zuba za gonjeni zupčanik:

$$S_{an2} = d_{a2} \left(\frac{\pi + 4x_2 \tan \alpha_n}{2z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$

Kut zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{373,399}{408}$$

$$\alpha_{at2} = 23,815^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{408}{397,3623} \tan 17^\circ \right)$$

$$\beta_{a2} = 17,43398^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan 23,815^\circ - \frac{\pi \cdot 23,815^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = 0,02572$$

Pri čemu u konačnici slijedi da je debljina vrha zuba jednaka:

$$S_{an2} = 408 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,3835 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 95} + 0,016929 - 0,02572 \right) \cdot \cos 17,43398^\circ$$

$$S_{an2} = 4,161 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

3.2. Kontrolni proračun za prvi stupanj reduktora

3.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika

Kontaktni pritisak na bokovima spregnutih zupčanika računa se prema formuli:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{b d_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Pri čemu su:

Faktor modula elastičnosti za čelik

$$Z_E = 190 \sqrt{\text{Mpa}}$$

Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20,837^\circ)} \sqrt{\frac{2 \cos(0,005)}{\tan(22,695^\circ)}} = 2,3399$$

Faktor nagiba zuba

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} = \sqrt{\cos(17^\circ)} = 0,97791$$

Faktor utjecaja prekrivanja

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a}} = \sqrt{\frac{1}{1,171}} = 0,92419$$

Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1} = \frac{2000 \cdot 1157,6}{96,204} = 24065,62 \text{ N}$$

Faktor primjene

$$K_A = 1,5$$

Obodna brzina

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{96,204 \cdot 2980}{19100} = 15 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja

$$Q = 6$$

$$K_v = K_{v\beta} = 1 + Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 6 \cdot 15 \cdot 23 \cdot 10^{-5} = 1,124$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu

$$K_{H\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left(\frac{b}{d_1} \right) + 0,0005b = 1,294$$

Zatim u konačnici dobivamo da je:

$$\sigma_H = 190 \cdot 2,3399 \cdot 0,9779 \cdot 0,92419 \sqrt{\frac{24065,62}{68 \cdot 92,204} \cdot \frac{4,16+1}{4,16}} 1,5 \cdot 1,124 \cdot 1,1 \cdot 1,294$$

$$\sigma_H = 1330,67 \text{ Mpa}$$

3.2.2. Sigurnost na pitting

Sigurnost na pitting se računa prema formuli:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{Hmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost na pitting

$$S_{Hmin} = 1,1$$

Trajna dinamička čvrstoća za Č5420

$$\sigma_{Hlim} = 1490 \text{ Mpa}$$

Tribomehanički faktor

$$Z_{LVR} = 1$$

Faktor povećanja tvrdoće

$$Z_w = 1$$

Faktor utjecaja veličine

$$Z_x = 1$$

Zatim dobivamo da je:

$$S_H = \frac{1490}{1330,67} 1 \cdot 1 \cdot 1 > 1,1$$

$$S_H = 1,12 > 1,1$$

3.2.3. Nosivost korijena zuba

Naprezanje na savijanje se dobiva formulom:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{bm_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\epsilon K_A K_V K_{F\alpha} K_{F\beta}$$

Pri čemu su:

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^3 \beta} = \frac{23}{\cos^3(17^\circ)} = 26,489$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,4555^2 + \frac{7,63}{26,489} - 15,94 \cdot \frac{0,4555}{26,489}$$

$$Y_{FS1} = 4,131$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^3 \beta} = \frac{95}{\cos^3(17^\circ)} = 108,626$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,3835^2 + \frac{7,63}{108,626} - 15,94 \cdot \frac{0,3835}{108,626}$$

$$Y_{FS2} = 4,12$$

Faktor kuta nagiba

$$Y_{\beta} = 1 - \frac{\varepsilon_{\beta}\beta}{120} = 1 - \frac{1,582 \cdot 17^{\circ}}{120} = 0,7759$$

Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\varepsilon} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_a} = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2(17^{\circ})}{1,171} = 0,8358$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu

$$K_{F\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} = 1,261$$

U konačnici dobivamo da je:

Naprezanje na savijanje za pogonski zupčanik

$$\sigma_{F1} = \frac{24065,62}{74 \cdot 4} 4,131 \cdot 0,7759 \cdot 0,8358 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,261$$

$$\sigma_{F1} = 498,543 \text{ MPa}$$

Naprezanje na savijanje za gonjeni zupčanik

$$\sigma_{F2} = \frac{24065,62}{68 \cdot 4} 4,12 \cdot 0,7759 \cdot 0,8358 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,261$$

$$\sigma_{F2} = 541,105 \text{ MPa}$$

3.2.4. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma se računa prema formuli:

$$S_F = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_F} Y_{\delta} Y_R Y_X \geq S_{Fmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost

$$S_{Fmin} \geq 1,4 \dots 2$$

Dinamička čvrstoća korijena zuba

$$\sigma_{FE} = 920 \text{ N/mm}^2$$

Faktor osjetljivosti materijala na zarez

$$Y_\delta = 1$$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba

$$Y_R = 1$$

Faktor veličine zupčanika

$$Y_x = 1$$

Sigurnost protiv loma za pogonski zupčanik:

$$S_{F1} = \frac{920}{498,543} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F1} = 1,845 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Sigurnost protiv loma za gonjeni zupčanik:

$$S_{F2} = \frac{920}{541,105} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F2} = 1,7 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

3.3. Izbor ulja za podmazivanje

3.3.1. Stribeckov pritisak

Stribeckov pritisak dobivamo prema formuli:

$$k_s = \frac{3F_t i_1 + 1}{b d_1 i_1}$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 24065,62 \cdot 4,16 + 1}{68 \cdot 96,204 \cdot 4,16}$$

$$k_s = 13,708 \text{ MPa}$$

Potrebna viskoznost ulja se dobiva prema formuli:

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{k_s}{\nu_1} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{13,708}{15} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 200,26 \text{ mm}^2/\text{s}$$

4. PRORAČUN DRUGOG STUPNJA REDUKTORA

4.1. Projektni proračun za drugi stupanj reduktora

Materijal koji će se koristiti za izradu zupčanika je Č5420, isti kao i kod prvog para.

4.1.1. Razmak osi zupčastog para

Za poznati ulazni moment $T_2 = 4719,4 \text{ Nm}$ formula za izračun razmaka osi glasi:

$$a \geq K_2(i_z + 1) \sqrt[3]{\frac{T_2}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_v \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \left(\frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hmin}} \right)^2}$$

Pri čemu je:

$$K_2 = 320$$

$$i_z = 4,16 - \text{prijenosni omjer}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \frac{i_z}{20} = 0,5 + \frac{4,16}{20} = 0,708 - \text{faktor širine zupčanika}$$

$$K_A = 1,5 - \text{faktor primjene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja}$$

$$K_v = 1,1 - \text{faktor dodatnih dinamičkih opterećenja}$$

$$K_{H\alpha} = 1,1 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu}$$

$$K_{H\beta} = 1,12 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž zuba}$$

$$S_{Hmin} = 1,1 - \text{minimalna sigurnost na pitting}$$

$$\sigma_{Hlim} = 1490 - \text{dinamička tvrdoće boka zuba}$$

Uvrštavanjem u formulu dobivamo da je razmak osi veći ili jednak:

$$a \geq 320(4,16+1) \sqrt[3]{\frac{4719,4}{0,708} \cdot \frac{4,16+1}{4,16} \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,12 \left(\frac{1,1}{1490} \right)^2}$$

$$a \geq 345,493 \text{ mm}$$

Usvajamo standardni razmak osi:

$$a = 400 \text{ mm}$$

4.1.2. Izbor modula

Za kose zube sa tvrdim i cementiranim bokovima formula glasi:

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2}$$

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{400 \cdot 4,16}{(1+4,16)^2}$$

$$m_n = 6,25 \text{ mm}$$

Usvajamo standardnu vrijednost 2. prioriteta:

$$m_n = 7 \text{ mm}$$

4.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

Broj zubi dobivamo formulom:

$$z_1 = \frac{2a \cdot \cos \beta}{m(i_z + 1)}$$

pri čemu je β nagib zuba i iznosi $\beta = 17^\circ$, pa dobivamo:

$$z_1 = \frac{2 \cdot 250 \cos 17^\circ}{7(4,16 + 1)}$$

$$z_1 = 21,181$$

$z_1 = 21$ – usvojen prvi manji cijeli broj

4.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = z_1 \cdot i_1$$

$$z_2 = 21 \cdot 4,16$$

$$z_2 = 87,36$$

$z_2 = 87$ – usvojen cijeli broj

4.1.5. Točan prijenosni omjer

Točan prijenosni omjer dobivamo formulom:

$$u = i = \frac{z_2}{z_1}$$

$$u = i = \frac{87}{21}$$

$$u = i = 4,14$$

Odstupanje od i_z dobivamo:

$$\Delta i = 1 - \frac{i_z}{i}$$

$$\Delta i = 1 - \frac{4,16}{4,14}$$

$$\Delta i = -0,00414 < 0,025$$

4.1.6. Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{7 \cdot 21}{\cos 17^\circ}$$

$$d_1 = 153,717 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta}$$

$$d_2 = \frac{7 \cdot 87}{\cos 17^\circ}$$

$$d_2 = 636,826 \text{ mm}$$

4.1.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$a_d = \frac{153,717 + 636,826}{2}$$

$$a_d = 395,271 \text{ mm}$$

$$a_d < a, a - a_d = (0...5)$$

$$a - a_d = 400 - 395,271 = 4,729 \text{ mm}$$

4.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1$$

$$b = b_2 = 0,708 \cdot 153,717$$

$$b = b_2 = 108,831 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 110 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

$$b_1 = b_2 + (2...10)$$

$$b_1 = 110 + 6$$

$$b_1 = 116 \text{ mm}$$

4.1.9. Stupanj prekrivanja profila

Stupanj prekrivanja profila iznosi:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi \cdot m_n}$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{110 \sin 17^\circ}{\pi \cdot 4,16}$$

$$\varepsilon_\beta = 1,462$$

4.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

Zahvatni kut za kose zube iznosi:

$$\text{za } \alpha_n = 20^\circ,$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}\right)$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan 20^\circ}{\cos 17^\circ}\right)$$

$$\alpha_t = 20,837^\circ$$

Pogonski zahvatni kut iznosi:

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos \alpha_t\right)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{395,271}{400} \cdot \cos 20,837^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 22,5496^\circ$$

4.1.11. Suma faktora pomaka profila

Vrijedi da je:

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2\tan\alpha_n} (z_1 + z_2) < 1,5$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan\alpha_{wt} - \frac{\pi\alpha_{wt}}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan 22,5496^\circ - \frac{\pi \cdot 22,5496^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0,0216633$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan\alpha_t - \frac{\pi\alpha_t}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan 20,837^\circ - \frac{\pi \cdot 20,837^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = 0,0169292$$

Suma faktora pomaka profila zatim iznosi:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,0216633 - 0,0169292}{2\tan 20^\circ} (21 + 87) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,7024 < 1,5$$

4.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku

Računa se prema formuli:

$$x_1 = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{[1 - (x_1 + x_2)] \ln u}{2 \ln \left(\frac{Z_{n1} Z_{n2}}{100} \right)}$$

Da bi izračunali x_1 , potrebno je izračunati ekvivalentan broj zuba za oba zupčanika, a koja se dobivaju formulama:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

uz uvjet da prvo moramo izračunati kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu prema formuli:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 17^\circ \cdot \cos 20^\circ)$$

$$\beta_b = 0,005$$

pa dobivamo da je:

$$Z_{n1} = \frac{21}{\cos^2 0,005 \cos 17^\circ}$$

$$Z_{n1} = 24,96$$

$$Z_{n2} = Z_{n1} \cdot u$$

$$Z_{n2} = 90,975$$

U konačnici dobivamo da je:

$$x_1 = \frac{0,7024}{2} + \frac{[1 - (0,7024)] \ln 4,14}{2 \ln \left(\frac{21,96 \cdot 90,975}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,4218$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1$$

$$x_2 = 0,2805$$

4.1.13. Promjeri preko korijena zuba

$$d_{f1} = m_n \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 7 \left(\frac{21}{\cos 17^\circ} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 142,122 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m_n \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 7 \left(\frac{87}{\cos 17^\circ} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 623,254 \text{ mm}$$

4.1.14. Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 400 - 623,254$$

$$d_{a1} = 173,246 \text{ mm, Usvajamo } d_{a1} = 173 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1}$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 400 - 142,122$$

$$d_{a2} = 654,378 \text{ mm, Usvajamo } d_{a2} = 655 \text{ mm}$$

4.1.15. Promjeri temeljnih krugova

$$d_{b1} = d_1 \cos \alpha_t$$

$$d_{b1} = 153,717 \cdot \cos 20,837^\circ$$

$$d_{b1} = 144,446 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t$$

$$d_{b2} = 636,826 \cdot \cos 20,837^\circ$$

$$d_{b2} = 598,421 \text{ mm}$$

4.1.16. Promjeri pogonskih krugova

$$d_{w1} = \frac{2a}{i_1 + 1}$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 400}{4,16+1}$$

$$d_{w1} = 155,556 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 2a - d_{w1}$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 400 - 155,556$$

$$d_{w2} = 402,542 \text{ mm}$$

4.1.17. Stupanj prekrivanja profila

Dobiva se prema formuli:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2a \sin \alpha_{wt}}{2\pi m_t \cdot \cos \alpha_t}$$

pri čemu je potrebno izračunati kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

$$m_t = \frac{7}{\cos 17^\circ}$$

pa dobivamo,

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{173^2 - 144,446^2} + \sqrt{655^2 - 598,421^2} - 2 \cdot 400 \cdot \sin 22,5496^\circ}{2\pi \cdot 7,3198 \cdot \cos 20,837^\circ}$$

$$\varepsilon_\alpha = 1,266 > 1,1 - \text{za kose zube}$$

4.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Formula za debljinu vrha zuba za pogonski zupčanik:

$$S_{an1} = d_{a1} \left(\frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

Kut zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}}$$

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{144,446}{173,246}$$

$$\alpha_{at1} = 33,513^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{173}{153,717} \tan(17^\circ) \right)$$

$$\beta_{a1} = 19,0126^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan 33,513^\circ - \frac{\pi \cdot 33,513^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = 0,077297$$

Pri čemu u konačnici slijedi da je debljina vrha zuba jednaka:

$$S_{an1} = 173 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,42818 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 21} + 0,016929 - 0,077297 \right) \cdot \cos 19,0126^\circ$$

$$S_{an1} = 4,75896 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Formula za debljinu vrha zuba za gonjeni zupčanik:

$$S_{an2} = d_{a2} \left(\frac{\pi + 4 x_2 \tan \alpha_n}{2 z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$

Kut zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{598,421}{655}$$

$$\alpha_{at2} = 23,8668^{\circ}$$

$$\beta_{a2} = \arctan\left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan\beta\right)$$

$$\beta_{a2} = \arctan\left(\frac{655}{636,826} \tan 17^{\circ}\right)$$

$$\beta_{a2} = 17,4405^{\circ}$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = \tan\alpha_{at2} - \frac{\pi\alpha_{at2}}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = \tan 23,8668^{\circ} - \frac{\pi \cdot 23,8668^{\circ}}{180^{\circ}}$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = 0,025892$$

Pri čemu u konačnici slijedi da je debljina vrha zuba jednaka:

$$S_{an2} = 655 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,2805 \cdot \tan 20^{\circ}}{2 \cdot 87} + 0,016929 - 0,025892 \right) \cdot \cos 17,4405^{\circ}$$

$$S_{an2} = 7,1419 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

4.2. Kontrolni proračun za drugi stupanj reduktora

4.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika

Kontaktни притисак на bokovima spregnutih zupčanika računa se prema formuli:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{b d_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Pri čemu su:

Faktor modula elastičnosti za čelik

$$Z_E = 190 \sqrt{\text{Mpa}}$$

Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20,837^\circ)} \sqrt{\frac{2 \cos(0,005)}{\tan(22,5496^\circ)}} = 2,348$$

Faktor nagiba zuba

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} = \sqrt{\cos(17^\circ)} = 0,97791$$

Faktor utjecaja prekrivanja

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a}} = \sqrt{\frac{1}{1,266}} = 0,88869$$

Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1} = \frac{2000 \cdot 4719,4}{153,717} = 61403,873 \text{ N}$$

Faktor primjene

$$K_A = 1,5$$

Obodna brzina

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{153,717 \cdot 716,329}{19100} = 5,765 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja

$$Q = 7$$

$$K_v = K_{v\beta} = 1 + Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 7^2 \cdot 5,765 \cdot 21 \cdot 10^{-5} = 1,059$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu

$$K_{H\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left(\frac{b}{d_1} \right) + 0,0005b = 1,317$$

Zatim u konačnici dobivamo da je:

$$\sigma_H = 190 \cdot 2,348 \cdot 0,9779 \cdot 0,88869 \sqrt{\frac{61403,873}{110 \cdot 153,717} \cdot \frac{4,14+1}{4,14}} 1,5 \cdot 1,059 \cdot 1,1 \cdot 1,317$$

$$\sigma_H = 1249,16 \text{ Mpa}$$

4.2.2. Sigurnost na pitting

Sigurnost na pitting se računa prema formuli:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{Hmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost na pitting

$$S_{Hmin} = 1,1$$

Trajna dinamička čvrstoća za Č5420

$$\sigma_{Hlim} = 1490 \text{ Mpa}$$

Tribomehanički faktor

$$Z_{LVR} = 1$$

Faktor povećanja tvrdoće

$$Z_W = 1$$

Faktor utjecaja veličine

$$Z_x = 1$$

Zatim dobivamo da je:

$$S_H = \frac{1490}{1249,16} 1 \cdot 1 \cdot 1 > 1,1$$

$$S_H = 1,19 > 1,1$$

4.2.3. Nosivost korijena zuba

Naprezanje na savijanje se dobiva formulom:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{bm_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\epsilon K_A K_V K_{Fa} K_{F\beta}$$

Pri čemu su:

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^3 \beta} = \frac{21}{\cos^3(17^\circ)} = 24,219$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,4218^2 + \frac{7,63}{24,219} - 15,94 \cdot \frac{0,4218}{24,219}$$

$$Y_{FS1} = 4,149$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^3 \beta} = \frac{87}{\cos^3(17^\circ)} = 99,89$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,281^2 + \frac{7,63}{99,89} - 15,94 \cdot \frac{0,281}{99,89}$$

$$Y_{FS2} = 4,126$$

Faktor kuta nagiba

$$Y_{\beta} = 1 - \frac{\varepsilon_{\beta}\beta}{120} = 1 - \frac{1,462 \cdot 17^{\circ}}{120} = 0,7928$$

Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\varepsilon} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_a} = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2(17^{\circ})}{1,462} = 0,7917$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu

$$K_{F\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} = 1,281$$

U konačnici dobivamo da je:

Naprezanje na savijanje za pogonski zupčanik

$$\sigma_{F1} = \frac{61403,873}{116 \cdot 7} 4,149 \cdot 0,793 \cdot 0,792 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,281$$

$$\sigma_{F1} = 458,052 \text{ MPa}$$

Naprezanje na savijanje za gonjeni zupčanik

$$\sigma_{F2} = \frac{61403,873}{110 \cdot 7} 4,126 \cdot 0,793 \cdot 0,792 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,281$$

$$\sigma_{F2} = 480,282 \text{ MPa}$$

4.2.4. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma se računa prema formuli:

$$S_F = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_F} Y_{\delta} Y_R Y_X \geq S_{Fmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost

$$S_{Fmin} \geq 1,4 \dots 2$$

Dinamička čvrstoća korijena zuba

$$\sigma_{FE} = 920 \text{ N/mm}^2$$

Faktor osjetljivosti materijala na zarez

$$Y_\delta = 1$$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba

$$Y_R = 1$$

Faktor veličine zupčanika

$$Y_x = 1$$

Sigurnost protiv loma za pogonski zupčanik:

$$S_{F1} = \frac{920}{458,052} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F1} = 1,968 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Sigurnost protiv loma za gonjeni zupčanik:

$$S_{F2} = \frac{920}{480,282} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F2} = 1,877 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

4.3. Izbor ulja za podmazivanje

4.3.1. Stribeckov pritisak

Stribeckov pritisak dobivamo prema formuli:

$$k_s = \frac{3F_t}{bd_1} \frac{i_1+1}{i_1}$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 61403,873}{110 \cdot 153,717} \cdot \frac{4,14+1}{4,14}$$

$$k_s = 13,524 \text{ MPa}$$

Potrebna viskoznost ulja se dobiva prema formuli:

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{k_s}{\nu_1} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{13,524}{5,765} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 297,65 \text{ mm}^2/\text{s}$$

5. PRORAČUN TREĆEG STUPNJA REDUKTORA

5.1. Projektni proračun za treći stupanj reduktora

Materijal koji će se koristiti za izradu zupčanika je Č5420, isti kao i kod prvog i drugog para.

5.1.1. Razmak osi zupčastog para

Za poznati ulazni moment $T_3 = 10185,5 \text{ Nm}$ formula za izračun razmaka osi glasi:

$$a \geq K_2(i_z + 1) \sqrt[3]{\frac{T_3}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \left(\frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hmin}} \right)^2}$$

Pri čemu je:

$$K_2 = 320$$

$$i_z = 4,16 - \text{prijenosni omjer}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \frac{i_z}{20} = 0,5 + \frac{4,16}{20} = 0,708 - \text{faktor širine zupčanika}$$

$$K_A = 1,5 - \text{faktor primjene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja}$$

$$K_V = 1,1 - \text{faktor dodatnih dinamičkih opterećenja}$$

$$K_{H\alpha} = 1,1 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu}$$

$$K_{H\beta} = 1,12 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž zuba}$$

$$S_{Hmin} = 1,1 - \text{minimalna sigurnost na pitting}$$

$$\sigma_{Hlim} = 1490 - \text{dinamička tvrdoće boka zuba}$$

Uvrštavanjem u formulu dobivamo da je razmak osi veći ili jednak:

$$a \geq 320(4,16+1) \sqrt[3]{\frac{10185,95}{0,708} \cdot \frac{4,16+1}{4,16} \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,12 \left(\frac{1,1}{1490} \right)^2}$$

$$a \geq 446,0689 \text{ mm}$$

Usvajamo standardni razmak osi:

$$a = 450 \text{ mm}$$

5.1.2. Izbor modula

Za kose zube sa tvrdim i cementiranim bokovima formula glasi:

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2}$$

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{450 \cdot 4,16}{(1+4,16)^2}$$

$$m_n = 7,03 \text{ mm}$$

Usvajamo standardnu vrijednost 2. prioriteta:

$$m_n = 8 \text{ mm}$$

5.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

Broj zubi dobivamo formulom:

$$z_1 = \frac{2a \cdot \cos \beta}{m(i_z + 1)}$$

pri čemu je β nagib zuba i iznosi $\beta = 17^\circ$, pa dobivamo:

$$z_1 = \frac{2 \cdot 450 \cos 17^\circ}{8(4,16 + 1)}$$

$$z_1 = 20,849$$

$z_1 = 21$ – usvojen prvi manji cijeli broj

5.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = z_1 \cdot i_1$$

$$z_2 = 21 \cdot 4,16$$

$$z_2 = 87,36$$

$z_2 = 86$ – usvojen cijeli broj

5.1.5. Točan prijenosni omjer

Točan prijenosni omjer dobivamo formulom:

$$u = i = \frac{z_2}{z_1}$$

$$u = i = \frac{86}{21}$$

$$u = i = 4,095$$

Odstupanje od i_z dobivamo:

$$\Delta i = 1 - \frac{i_z}{i}$$

$$\Delta i = 1 - \frac{4,16}{4,095}$$

$$\Delta i = -0,00158 < 0,025$$

5.1.6. Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{8 \cdot 21}{\cos 17^\circ}$$

$$d_1 = 155,676 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta}$$

$$d_2 = \frac{8 \cdot 86}{\cos 17^\circ}$$

$$d_2 = 719,436 \text{ mm}$$

5.1.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$a_d = \frac{155,676 + 719,436}{2}$$

$$a_d = 447,556 \text{ mm}$$

$$a_d < a, a - a_d = (0...5)$$

$$a - a_d = 450 - 447,556 = 2,444 \text{ mm}$$

5.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1$$

$$b = b_2 = 0,708 \cdot 175,676$$

$$b = b_2 = 124,730 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 125 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

$$b_1 = b_2 + (2...10)$$

$$b_1 = 125 + 6$$

$$b_1 = 131 \text{ mm}$$

5.1.9. Stupanj prekrivanja profila

Stupanj prekrivanja profila iznosi:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi \cdot m_n}$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{125 \sin 17^\circ}{\pi \cdot 8}$$

$$\varepsilon_\beta = 1,454$$

5.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

Zahvatni kut za kose zube iznosi:

$$\text{za } \alpha_n = 20^\circ,$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}\right)$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan 20^\circ}{\cos 17^\circ}\right)$$

$$\alpha_t = 20,837^\circ$$

Pogonski zahvatni kut iznosi:

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos \alpha_t\right)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{447,556}{450} \cdot \cos 20,837^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 21,6398^\circ$$

5.1.11. Suma faktora pomaka profila

Vrijedi da je:

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv} \alpha_{wt} - \text{inv} \alpha_t}{2 \tan \alpha_n} (z_1 + z_2) < 1,5$$

$$\text{inv} \alpha_{wt} = \tan \alpha_{wt} - \frac{\pi \alpha_{wt}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{wt} = \tan 21,6398^\circ - \frac{\pi \cdot 21,6398^\circ}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{wt} = 0,019046$$

$$\text{inv} \alpha_t = \tan \alpha_t - \frac{\pi \alpha_t}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_t = \tan 20,837^\circ - \frac{\pi \cdot 20,837^\circ}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_t = 0,0169292$$

Suma faktora pomaka profila zatim iznosi:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,019046 - 0,0169292}{2 \tan 20^\circ} (21 + 86) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,3112 < 1,5$$

5.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku

Računa se prema formuli:

$$x_1 = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{[1 - (x_1 + x_2)] \ln u}{2 \ln \left(\frac{Z_{n1} Z_{n2}}{100} \right)}$$

Da bi izračunali x_1 , potrebno je izračunati ekvivalentan broj zuba za oba zupčanika, a koja se dobivaju formulama:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

uz uvjet da prvo moramo izračunati kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu prema formuli:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 17^\circ \cdot \cos 20^\circ)$$

$$\beta_b = 0,005$$

pa dobivamo da je:

$$Z_{n1} = \frac{21}{\cos^2 0,005 \cos 17^\circ}$$

$$Z_{n1} = 21,96$$

$$Z_{n2} = Z_{n1} \cdot u$$

$$Z_{n2} = 89,93$$

U konačnici dobivamo da je:

$$x_1 = \frac{0,3112}{2} + \frac{[1-(0,3112)] \ln 4,095}{2 \ln \left(\frac{21,96 \cdot 89,93}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,4218$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1$$

$$x_2 = -0,0072$$

5.1.13. Promjeri preko korijena zuba

$$d_{f1} = m_n \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 8 \left(\frac{21}{\cos 17^\circ} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 160,770 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m_n \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 8 \left(\frac{86}{\cos 17^\circ} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 699,321 \text{ mm}$$

5.1.14. Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 450 - 699,321$$

$$d_{a1} = 196,679 \text{ mm, Usvajamo } d_{a1} = 197 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1}$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 450 - 160,77$$

$$d_{a2} = 735,23 \text{ mm, Usvajamo } d_{a2} = 736 \text{ mm}$$

5.1.15. Promjeri temeljnih krugova

$$d_{b1} = d_1 \cos \alpha_t$$

$$d_{b1} = 175,676 \cdot \cos 20,837^\circ$$

$$d_{b1} = 165,082 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t$$

$$d_{b2} = 719,436 \cdot \cos 20,837^\circ$$

$$d_{b2} = 676,049 \text{ mm}$$

5.1.16. Promjeri pogonskih krugova

$$d_{w1} = \frac{2a}{i_1 + 1}$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 450}{4,16 + 1}$$

$$d_{w1} = 176,636 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 2a - d_{w1}$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 450 - 176,636$$

$$d_{w2} = 723,634 \text{ mm}$$

5.1.17. Stupanj prekrivanja profila

Dobiva se prema formuli:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2a \sin \alpha_{wt}}{2\pi m_t \cdot \cos \alpha_t}$$

pri čemu je potrebno izračunati kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

$$m_t = \frac{8}{\cos 17^\circ}$$

$$m_t = 8,366$$

pa dobivamo,

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{197^2 - 165,082^2} + \sqrt{736^2 - 676,049^2} - 2 \cdot 450 \cdot \sin 21,6398^\circ}{2\pi \cdot 8,366 \cdot \cos 20,837^\circ}$$

$$\varepsilon_\alpha = 1,348 > 1,1 \text{ – za kose zube}$$

5.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Formula za debljinu vrha zuba za pogonski zupčanik:

$$S_{an1} = d_{a1} \left(\frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

Kut zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}}$$

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{165,082}{196,679}$$

$$\alpha_{at1} = 32,929^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{197}{175,676} \tan(17^\circ) \right)$$

$$\beta_{a1} = 18,8952^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan 32,929^\circ - \frac{\pi \cdot 32,929^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = 0,072928$$

Pri čemu u konačnici slijedi da je debljina vrha zuba jednaka:

$$S_{an1} = 197 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,318353 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 21} + 0,016929 - 0,072928 \right) \cdot \cos 18,895^\circ$$

$$S_{an1} = 5,5519 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Formula za debljinu vrha zuba za gonjeni zupčanik:

$$S_{an2} = d_{a2} \left(\frac{\pi + 4x_2 \tan \alpha_n}{2z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$

Kut zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{676,049}{736}$$

$$\alpha_{at2} = 23,146^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{736}{719,436} \tan 17^\circ \right)$$

$$\beta_{a2} = 17,351^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan 23,146^\circ - \frac{\pi \cdot 23,146^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = 0,023512$$

Pri čemu u konačnici slijedi da je debljina vrha zuba jednaka:

$$S_{an2} = 736 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot (-0,007202 \cdot \tan 20^\circ)}{2 \cdot 86} + 0,016929 - 0,023512 \right) \cdot \cos 17,351^\circ$$

$$S_{an2} = 8,1559 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

5.2. Kontrolni proračun za treći stupanj reduktora

5.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika

Kontaktни притисак на бокovima спрегнутих зупчаника рачуна се према формули:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{b d_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Pri čemu su:

Faktor modula elastičnosti za čelik

$$Z_E = 190 \sqrt{\text{Mpa}}$$

Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20,837^\circ)} \sqrt{\frac{2 \cos(0,005)}{\tan(21,6398^\circ)}} = 2,402$$

Faktor nagiba zuba

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} = \sqrt{\cos(17^\circ)} = 0,97791$$

Faktor utjecaja prekrivanja

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a}} = \sqrt{\frac{1}{1,348}} = 0,9779$$

Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1} = \frac{2000 \cdot 10185,95}{175,676} = 115962,767 \text{ N}$$

Faktor primjene

$$K_A = 1,5$$

Obodna brzina

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{175,676 \cdot 172,19}{19100} = 1,584 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja

$$Q = 9$$

$$K_v = K_{v\beta} = 1 + Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 9^2 \cdot 1,584 \cdot 21 \cdot 10^{-5} = 1,0269$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu

$$K_{H\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left(\frac{b}{d_1} \right) + 0,0005b = 1,324$$

Zatim u konačnici dobivamo da je:

$$\sigma_H = 190 \cdot 2,402 \cdot 0,9779 \cdot 0,8614 \sqrt{\frac{115962,767}{125 \cdot 175,676} \cdot \frac{4,095+1}{4,095}} 1,5 \cdot 1,0269 \cdot 1,1 \cdot 1,324$$

$$\sigma_H = 1476,019 \text{ Mpa}$$

5.2.2. Sigurnost na pitting

Sigurnost na pitting se računa prema formuli:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{Hmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost na pitting

$$S_{Hmin} = 1,1$$

Trajna dinamička čvrstoća za Č5420

$$\sigma_{Hlim} = 1490 \text{ Mpa}$$

Tribomehanički faktor

$$Z_{LVR} = 1$$

Faktor povećanja tvrdoće

$$Z_w = 1$$

Faktor utjecaja veličine

$$Z_x = 1$$

Zatim dobivamo da je:

$$S_H = \frac{1490}{1476,019} 1 \cdot 1 \cdot 1 > 1,1$$

$$S_H = 1,13 > 1,1$$

5.2.3. Nosivost korijena zuba

Naprezanje na savijanje se dobiva formulom:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{bm_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\epsilon K_A K_V K_{Fa} K_{F\beta}$$

Pri čemu su:

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^3 \beta} = \frac{21,96}{\cos^3(17^\circ)} = 24,1098$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,3184^2 + \frac{7,63}{24,1098} - 15,94 \cdot \frac{0,3184}{24,1098}$$

$$Y_{FS1} = 4,2$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^3 \beta} = \frac{87,36}{\cos^3(17^\circ)} = 448,748$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot (-0,0072)^2 + \frac{7,63}{448,748} - 15,94 \cdot \frac{(-0,0072)}{448,748}$$

$$Y_{FS2} = 4,097$$

Faktor kuta nagiba

$$Y_{\beta} = 1 - \frac{\varepsilon_{\beta}\beta}{120} = 1 - \frac{1,454 \cdot 17^{\circ}}{120} = 0,794$$

Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\varepsilon} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_a} = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2(17^{\circ})}{1,348} = 0,4349$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu

$$K_{F\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} = 1,287$$

U konačnici dobivamo da je:

Naprezanje na savijanje za pogonski zupčanik

$$\sigma_{F1} = \frac{115962,767}{125 \cdot 8} 4,2 \cdot 0,794 \cdot 0,435 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,287$$

$$\sigma_{F1} = 374,948 \text{ MPa}$$

Naprezanje na savijanje za gonjeni zupčanik

$$\sigma_{F2} = \frac{115962,767}{125 \cdot 8} 4,097 \cdot 0,794 \cdot 0,434 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,281$$

$$\sigma_{F2} = 283,333 \text{ MPa}$$

5.2.4. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma se računa prema formuli:

$$S_F = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_F} Y_{\delta} Y_R Y_X \geq S_{Fmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost

$$S_{Fmin} \geq 1,4...2$$

Dinamička čvrstoća korijena zuba

$$\sigma_{FE} = 920 \text{ N/mm}^2$$

Faktor osjetljivosti materijala na zareze

$$Y_{\delta} = 1$$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba

$$Y_R = 1$$

Faktor veličine zupčanika

$$Y_x = 1$$

Sigurnost protiv loma za pogonski zupčanik:

$$S_{F1} = \frac{920}{374,948} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F1} = 2,38 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Sigurnost protiv loma za gonjeni zupčanik:

$$S_{F2} = \frac{920}{383,333} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F2} = 1,877 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

5.3. Izbor ulja za podmazivanje

5.3.1. Stribeckov pritisak

Stribeckov pritisak dobivamo prema formuli:

$$k_s = \frac{3F_t}{bd_1} \frac{i_1+1}{i_1}$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 115962,767}{125 \cdot 175,676} \cdot \frac{4,095+1}{4,095}$$

$$k_s = 19,717 \text{ MPa}$$

Potrebna viskoznost ulja se dobiva prema formuli:

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{k_s}{\nu_1} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{19,717}{1,584} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 596,732 \text{ mm}^2/\text{s}$$

6. PRORAČUN TREĆEG STUPNJA REDUKTORA (MANJI PRIJENOSNI OMJER)

6.1. Projektni proračun za treći stupanj reduktora (manji prijenosni omjer)

Materijal koji će se koristiti za izradu zupčanika je Č5420, isti kao i kod prvog i drugog para.

6.1.1. Razmak osi zupčastog para

Za poznati ulazni moment $T_3 = 10185,5 \text{ Nm}$ formula za izračun razmaka osi glasi:

$$a \geq K_2(i_z + 1) \sqrt[3]{\frac{T_3}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \left(\frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hmin}} \right)^2}$$

Pri čemu je:

$$K_2 = 320$$

$$i_z = 3,12 - \text{prijenosni omjer}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \frac{i_z}{20} = 0,5 + \frac{4,16}{20} = 0,708 - \text{faktor širine zupčanika}$$

$$K_A = 1,5 - \text{faktor primjene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja}$$

$$K_V = 1,1 - \text{faktor dodatnih dinamičkih opterećenja}$$

$$K_{H\alpha} = 1,1 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu}$$

$$K_{H\beta} = 1,12 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž zuba}$$

$$S_{Hmin} = 1,1 - \text{minimalna sigurnost na pitting}$$

$$\sigma_{Hlim} = 1490 - \text{dinamička tvrdoće boka zuba}$$

Uvrštavanjem u formulu dobivamo da je razmak osi veći ili jednak:

$$a \geq 320(4,16+1) \sqrt[3]{\frac{9054,61}{0,708} \cdot \frac{3,12+1}{3,12} \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,12 \left(\frac{1,1}{1490} \right)^2}$$

$$a \geq 349,6775 \text{ mm}$$

Usvajamo veći razmak osi zbog koaksijalnosti, zbog čega će nam ovaj stupanj biti predimenzioniran, no to ne možemo izbjeći:

Razmak osi je:

$$a = 450 \text{ mm}$$

6.1.2. Izbor modula

Za kose zube sa tvrdim i cementiranim bokovima formula glasi:

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2}$$

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{450 \cdot 3,12}{(1+3,12)^2}$$

$$m_n = 8,271 \text{ mm}$$

Usvajamo standardnu vrijednost 2. prioriteta:

$$m_n = 9 \text{ mm}$$

6.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

Broj zubi dobivamo formulom:

$$z_1 = \frac{2a \cdot \cos \beta}{m(i_z + 1)}$$

pri čemu je β nagib zuba i iznosi $\beta = 17^\circ$, pa dobivamo:

$$z_1 = \frac{2 \cdot 450 \cos 17^\circ}{9(3,12 + 1)}$$

$$z_1 = 23,211$$

$z_1 = 23$ – usvojen prvi manji cijeli broj

6.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = z_1 \cdot i_1$$

$$z_2 = 23 \cdot 3,12$$

$$z_2 = 71,76$$

$z_2 = 72$ – usvojen cijeli broj

6.1.5. Točan prijenosni omjer

Točan prijenosni omjer dobivamo formulom:

$$u = i = \frac{z_2}{z_1}$$

$$u = i = \frac{72}{23}$$

$$u = i = 3,13$$

Odstupanje od i_z dobivamo:

$$\Delta i = 1 - \frac{i_z}{i}$$

$$\Delta i = 1 - \frac{3,12}{3,13}$$

$$\Delta i = -0,00333 < 0,025$$

6.1.6. Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{9 \cdot 23}{\cos 17^\circ}$$

$$d_1 = 216,458 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta}$$

$$d_2 = \frac{9 \cdot 72}{\cos 17^\circ}$$

$$d_2 = 677,608 \text{ mm}$$

6.1.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$a_d = \frac{216,458 + 677,608}{2}$$

$$a_d = 447,033 \text{ mm}$$

$$a_d < a, \quad a - a_d = (0 \dots 5)$$

$$a - a_d = 450 - 447,556 = 2,444 \text{ mm}$$

6.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1$$

$$b = b_2 = 0,708 \cdot 216,458$$

$$b = b_2 = 153,685 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 154 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

$$b_1 = b_2 + (2 \dots 10)$$

$$b_1 = 154 + 8$$

$$b_1 = 162 \text{ mm}$$

6.1.9. Stupanj prekrivanja profila

Stupanj prekrivanja profila iznosi:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi \cdot m_n}$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{154 \sin 17^\circ}{\pi \cdot 9}$$

$$\varepsilon_\beta = 1,592$$

6.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

Zahvatni kut za kose zube iznosi:

za $\alpha_n = 20^\circ$,

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan\alpha_n}{\cos\beta}\right)$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan 20^\circ}{\cos 17^\circ}\right)$$

$$\alpha_t = 20,837^\circ$$

Pogonski zahvatni kut iznosi:

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos\alpha_t\right)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{447,033}{450} \cdot \cos 20,837^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 21,808^\circ$$

6.1.11. Suma faktora pomaka profila

Vrijedi da je:

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2\tan\alpha_n} (z_1 + z_2) < 1,5$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan\alpha_{wt} - \frac{\pi\alpha_{wt}}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan 21,808^\circ - \frac{\pi \cdot 21,808^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0,019512$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan\alpha_t - \frac{\pi\alpha_t}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan 20,837^\circ - \frac{\pi \cdot 20,837^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = 0,0169292$$

Suma faktora pomaka profila zatim iznosi:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,019512 - 0,0169292}{2\tan 20^\circ} (23 + 72) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,33704 < 1,5$$

6.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku

Računa se prema formuli:

$$x_1 = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{[1 - (x_1 + x_2)] \ln u}{2 \ln \left(\frac{Z_{n1} Z_{n2}}{100} \right)}$$

Da bi izračunali x_1 , potrebno je izračunati ekvivalentan broj zuba za oba zupčanika, a koja se dobivaju formulama:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

uz uvjet da prvo moramo izračunati kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu prema formuli:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 17^\circ \cdot \cos 20^\circ)$$

$$\beta_b = 0,005$$

pa dobivamo da je:

$$Z_{n1} = \frac{23}{\cos^2 0,005 \cos 17^\circ}$$

$$Z_{n1} = 24,0509$$

$$Z_{n2} = Z_{n1} \cdot u$$

$$Z_{n2} = 75,279$$

U konačnici dobivamo da je:

$$x_1 = \frac{0,33704}{2} + \frac{[1 - (0,33704)] \ln 3,12}{2 \ln \left(\frac{24,0509 \cdot 75,279}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,2991$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1$$

$$x_2 = -0,0379$$

6.1.13. Promjeri preko korijena zuba

$$d_{f1} = m_n \left(\frac{z_1}{\cos\beta} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 9 \left(\frac{23}{\cos 17^\circ} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 199,343 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m_n \left(\frac{z_2}{\cos\beta} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 9 \left(\frac{72}{\cos 17^\circ} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 655,791 \text{ mm}$$

6.1.14. Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 450 - 655,791$$

$$d_{a1} = 239,709 \text{ mm, Usvajamo } d_{a1} = 240 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1}$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 450 - 199,343$$

$$d_{a2} = 696,157 \text{ mm, Usvajamo } d_{a2} = 696 \text{ mm}$$

6.1.15. Promjeri temeljnih krugova

$$d_{b1} = d_1 \cos\alpha_t$$

$$d_{b1} = 216,458 \cdot \cos 20,837^\circ$$

$$d_{b1} = 203,404 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t$$

$$d_{b2} = 677,608 \cdot \cos 20,837^\circ$$

$$d_{b2} = 636,743 \text{ mm}$$

6.1.16. Promjeri pogonskih krugova

$$d_{w1} = \frac{2a}{i_1 + 1}$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 450}{3,12 + 1}$$

$$d_{w1} = 217,895 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 2a - d_{w1}$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 450 - 217,895$$

$$d_{w2} = 682,105 \text{ mm}$$

6.1.17. Stupanj prekrivanja profila

Dobiva se prema formuli:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2a \sin \alpha_{wt}}{2\pi m_t \cos \alpha_t}$$

pri čemu je potrebno izračunati kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

$$m_t = \frac{9}{\cos 17^\circ}$$

$$m_t = 9,411$$

pa dobivamo,

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{240^2 - 203,404^2} + \sqrt{696^2 - 636,743^2} - 2 \cdot 450 \cdot \sin 21,8079^\circ}{2\pi \cdot 9,411 \cdot \cos 20,837^\circ}$$

$\varepsilon_\alpha = 1,333 > 1,1$ – za kose zube

6.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Formula za debljinu vrha zuba za pogonski zupčanik:

$$S_{an1} = d_{a1} \left(\frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

Kut zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}}$$

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{203,403}{239,706}$$

$$\alpha_{at1} = 31,946^\circ$$

$$\beta_{at1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{at1} = \arctan \left(\frac{240}{216,458} \tan(17^\circ) \right)$$

$$\beta_{at1} = 18,705^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan 31,946^\circ - \frac{\pi \cdot 31,946^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = 0,065989$$

Pri čemu u konačnici slijedi da je debljina vrha zuba jednaka:

$$S_{an1} = 240 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,2991 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 23} + 0,016929 - 0,065989 \right) \cdot \cos 18,705^\circ$$

$$S_{an1} = 6,515 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Formula za debljinu vrha zuba za gonjeni zupčanik:

$$S_{an2} = d_{a2} \left(\frac{\pi + 4x_2 \tan \alpha_n}{2z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$

Kut zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{636,743}{696}$$

$$\alpha_{at2} = 23,843^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{696}{677,608} \tan 17^\circ \right)$$

$$\beta_{a2} = 17,438^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan 23,843^\circ - \frac{\pi \cdot 23,843^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = 0,025812$$

Pri čemu u konačnici slijedi da je debljina vrha zuba jednaka:

$$S_{an2} = 696 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot (0,0379 \cdot \tan 20^\circ)}{2 \cdot 72} + 0,016929 - 0,025812 \right) \cdot \cos 17,4375^\circ$$

$$S_{an2} = 8,845 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

6.2. Kontrolni proračun za treći stupanj reduktora (manji prijenosni omjer)

6.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika

Kontaktni pritisak na bokovima spregnutih zupčanika računa se prema formuli:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{b d_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Pri čemu su:

Faktor modula elastičnosti za čelik

$$Z_E = 190 \sqrt{\text{Mpa}}$$

Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20,837^\circ)} \sqrt{\frac{2 \cos(0,005)}{\tan(21,808^\circ)}} = 2,392$$

Faktor nagiba zuba

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} = \sqrt{\cos(17^\circ)} = 0,97791$$

Faktor utjecaja prekrivanja

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a}} = \sqrt{\frac{1}{1,322}} = 0,8662$$

Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1} = \frac{2000 \cdot 9054,61}{216,458} = 83661,512 \text{ N}$$

Faktor primjene

$$K_A = 1,5$$

Obodna brzina

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{216,458 \cdot 172,19}{19100} = 1,951 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja

$$Q = 9$$

$$K_v = K_{v\beta} = 1 + Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 9^2 \cdot 1,951 \cdot 23 \cdot 10^{-5} = 1,036$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu

$$K_{Ha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left(\frac{b}{d_1} \right) + 0,0005b = 1,338$$

Zatim u konačnici dobivamo da je:

$$\sigma_H = 190 \cdot 2,392 \cdot 0,9779 \cdot 0,8661 \sqrt{\frac{83661,512}{154 \cdot 216,458} \cdot \frac{3,13+1}{3,13}} 1,5 \cdot 1,036 \cdot 1,1 \cdot 1,338$$

$$\sigma_H = 1059,759 \text{ Mpa}$$

6.2.2. Sigurnost na pitting

Sigurnost na pitting se računa prema formuli:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{Hmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost na pitting

$$S_{Hmin} = 1,1$$

Trajna dinamička čvrstoća za Č5420

$$\sigma_{Hlim} = 1490 \text{ Mpa}$$

Tribomehanički faktor

$$Z_{LVR} = 1$$

Faktor povećanja tvrdoće

$$Z_w = 1$$

Faktor utjecaja veličine

$$Z_x = 1$$

Zatim dobivamo da je:

$$S_H = \frac{1490}{1059,759} 1 \cdot 1 \cdot 1 > 1,1$$

$$S_H = 1,406 > 1,1$$

6.2.3. Nosivost korijena zuba

Naprezanje na savijanje se dobiva formulom:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{bm_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\epsilon K_A K_V K_{Fa} K_{F\beta}$$

Pri čemu su:

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^3 \beta} = \frac{23,21}{\cos^3(17^\circ)} = 27,5$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,291^2 + \frac{7,63}{27,5} - 15,94 \cdot \frac{0,291}{27,5}$$

$$Y_{FS1} = 4,2$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^3 \beta} = \frac{71,76}{\cos^3(17^\circ)} = 375,696$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,0379^2 + \frac{7,63}{375,696} - 15,94 \cdot \frac{0,0379}{375,696}$$

$$Y_{FS2} = 4,099$$

Faktor kuta nagiba

$$Y_{\beta} = 1 - \frac{\varepsilon_{\beta}\beta}{120} = 1 - \frac{1,592 \cdot 17^{\circ}}{120} = 0,774$$

Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\varepsilon} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_a} = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2(17^{\circ})}{1,348} = 0,437$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu

$$K_{F\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} = 1,2997$$

U konačnici dobivamo da je:

Naprezanje na savijanje za pogonski zupčanik

$$\sigma_{F1} = \frac{83661,513}{154 \cdot 9} 4,2 \cdot 0,774 \cdot 0,437 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,2997$$

$$\sigma_{F1} = 192,419 \text{ MPa}$$

Naprezanje na savijanje za gonjeni zupčanik

$$\sigma_{F2} = \frac{83661,513}{162 \cdot 9} 4,099 \cdot 0,774 \cdot 0,437 \cdot 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,2997$$

$$\sigma_{F2} = 197,538 \text{ MPa}$$

6.2.4. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma se računa prema formuli:

$$S_F = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_F} Y_{\delta} Y_R Y_X \geq S_{Fmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost

$$S_{Fmin} \geq 1,4...2$$

Dinamička čvrstoća korijena zuba

$$\sigma_{FE} = 920 \text{ N/mm}^2$$

Faktor osjetljivosti materijala na zareze

$$Y_\delta = 1$$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba

$$Y_R = 1$$

Faktor veličine zupčanika

$$Y_x = 1$$

Sigurnost protiv loma za pogonski zupčanik:

$$S_{F1} = \frac{920}{192,419} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F1} = 4,5899 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Sigurnost protiv loma za gonjeni zupčanik:

$$S_{F2} = \frac{920}{197,538} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F2} = 4,471 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

6.3. Izbor ulja za podmazivanje

6.3.1. Stribeckov pritisak

Stribeckov pritisak dobivamo prema formuli:

$$k_s = \frac{3F_t i_1 + 1}{bd_1 i_1}$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 83661,513 \cdot 3,13 + 1}{154 \cdot 216,458 \cdot 3,13}$$

$$k_s = 9,934 \text{ MPa}$$

Potrebna viskoznost ulja se dobiva prema formuli:

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{k_s}{\nu_1} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{9,934}{1,951} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 410,68 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Vidljivo je da treći stupanj zahtjeva viskoznost ulja od minimalno 597 mm²/s, a viskoznost 410 mm²/s za treći stupanj manjeg prijenosnog omjera. Time je određeno da će za reduktor viskoznost ulja biti 597 mm²/s.

6.3.2. Sustav za podmazivanje i hlađenje reduktora

Sustav za podmazivanje i hlađenje zupčanika reduktora je izveden tako da se bakrene cijevi u vidu brizgaljki postavljaju na gornji dio kućišta iznad zahvata zupčanika. Takav sustav razvoda ulja se izrađuje praktički prije montaže reduktora.

Uljnu crpku i sustav hlađenja odabire korisnik.

7. IZBOR LEŽAJA I PROMJER VRATILA

7.1. Vratilo 1

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$\tau_{dop} = \frac{R_{dt1}}{10 \dots 12}$, R_{dt1} – vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)

$$\tau_{dop} = \frac{300}{11}$$

$$\tau_{dop} = 27,273 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot 1157,6}{\pi \cdot 27,273}}$$

$$d_{vr1} = 60,0159 \text{ mm}$$

Usvajamo $d_{vr1} = 63 \text{ mm}$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} \text{ – obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 1157,6}{97,458}$$

$$F_{wt} = 23755,965 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 23755,965 \cdot \tan(22,695)$$

$$F_r = 9934,97 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = 0,309716$$

pa je:

$$F_a = 23755,965 \cdot 0,309716$$

$$F_a = 7357,598 \text{ N}$$

Po dobivenim aksijalnim i radijalnim silama odabiremo stožasti ležaj 32016X (SKF katalog).

Trajnost ležaja izražavamo u satima i ono mora biti veće od zadane vrijednosti, a ona iznosi:

$$L_{hmin} = 27043 \text{ h} > 12000 \text{ h}$$



32016 X

- Popular item

Tapered roller bearings, single row

Bearing data

Tolerances

Normal and CL7C, CLN, Normal and CL, deviating width

Bearing interfaces

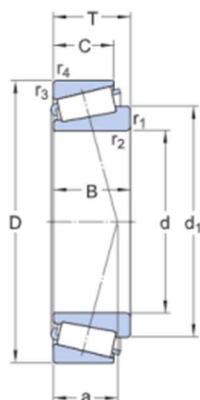
Seat tolerances for standard conditions,

Tolerances and resultant fit

Technical specification

Dimension series

3CC



DIMENSIONS

d	80 mm	Bore diameter
D	125 mm	Outside diameter
T	29 mm	Total width
d1	≈103.65 mm	Shoulder diameter of inner ring
B	29 mm	Width of inner ring
C	22 mm	Width of outer ring
r _{1,2}	min. 1.5 mm	Chamfer dimension of inner ring
r _{3,4}	min. 1.5 mm	Chamfer dimension of outer ring
a	26.646 mm	Distance side face to pressure point

ABUTMENT DIMENSIONS

d _a	max. 90 mm	Diameter of shaft abutment
d _b	min. 90 mm	Diameter of shaft abutment
Da	min. 112 mm	Diameter of housing abutment

Slika 7.1. Stožasti valjkasti ležaj 32016 X

7.2. Vratilo 2

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt1}}{10 \dots 12}, R_{dt1} - \text{vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)}$$

$$\tau_{dop} = \frac{375}{11}$$

$$\tau_{dop} = 34 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr2} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot 4719,4}{\pi \cdot 34}}$$

$$d_{vr2} = 89,0033 \text{ mm}$$

$$\text{Usvajamo } d_{vr1} = 100 \text{ mm}$$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} - \text{obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 1157,6}{97,458}$$

$$F_{wt} = 23755,965 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 23755,965 \cdot \tan(22,695)$$

$$F_r = 9934,97 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = 0,309716$$

pa je:

$$F_a = 23755,965 \cdot 0,309716$$

$$F_a = 7357,598 \text{ N}$$

Po dobivenim aksijalnim i radijalnim silama odabiremo stožasti ležaj 32922 (SKF katalog).

Trajnost ležaja izražavamo u satima i ono mora biti veće od zadane vrijednosti, a ona iznosi:

$$L_{hmin} = 2830 \text{ h} > 12000 \text{ h}$$



32922

Tapered roller bearings, single row

Bearing data

Tolerances,

Normal and CL7C, CLN, Normal and CL, deviating width

Bearing interfaces

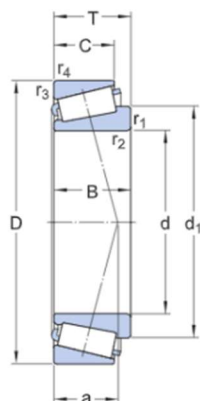
Seat tolerances for standard conditions,

Tolerances and resultant fit

Technical specification

Dimension series

2CC



DIMENSIONS

d	110 mm	Bore diameter
D	150 mm	Outside diameter
T	25 mm	Total width
d1	≈129.43 mm	Shoulder diameter of inner ring
B	25 mm	Width of inner ring
C	20 mm	Width of outer ring
r _{1,2}	min. 1.5 mm	Chamfer dimension of inner ring
r _{3,4}	min. 1.5 mm	Chamfer dimension of outer ring
a	26.148 mm	Distance side face to pressure point

ABUTMENT DIMENSIONS

da	max.119 mm	Diameter of shaft abutment
db	min.120.5 mm	Diameter of shaft abutment

Slika 7.2. Stožasti valjkasti ležaj 32922

7.3. Vratilo 3

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr3} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt1}}{10 \dots 12}, R_{dt1} - \text{vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)}$$

$$\tau_{dop} = \frac{300}{11}$$

$$\tau_{dop} = 27,273 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr2} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot 10185,95}{\pi \cdot 27,273}}$$

$$d_{vr2} = 123,903 \text{ mm}$$

$$\text{Usvajamo } d_{vr1} = 125 \text{ mm}$$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} - \text{obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 4719,4}{155,556}$$

$$F_{wt} = 60678 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 60678 \cdot \tan(22,5496)$$

$$F_r = 25195,19 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = 0,309388$$

pa je:

$$F_a = 60678 \cdot 0,309388$$

$$F_a = 18773,05 \text{ N}$$

Po dobivenim aksijalnim i radijalnim silama odabiremo stožasti ležaj 32930 (SKF katalog).

Trajnost ležaja izražavamo u satima i ono mora biti veće od zadane vrijednosti, a ona iznosi:

$$L_{hmin} = 60258 \text{ h} > 12000 \text{ h}$$



32930

Tapered roller bearings, single row

Bearing data

Tolerances,

Normal and CL7C, CLN, Normal and CL, deviating width

Bearing interfaces

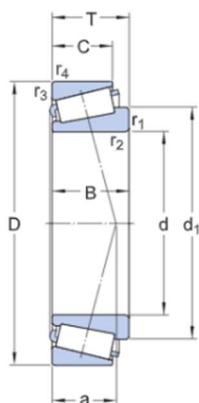
Seat tolerances for standard conditions,

Tolerances and resultant fit

Technical specification

Dimension series

2CC



DIMENSIONS

d	150 mm	Bore diameter
D	210 mm	Outside diameter
T	38 mm	Total width
d ₁	≈ 177.8 mm	Shoulder diameter of inner ring
B	38 mm	Width of inner ring
C	30 mm	Width of outer ring
r _{1,2}	min. 2.5 mm	Chamfer dimension of inner ring
r _{3,4}	min. 2 mm	Chamfer dimension of outer ring
a	35.8 mm	Distance side face to pressure point

ABUTMENT DIMENSIONS

da	max.163 mm	Diameter of shaft abutment
db	min.163.5 mm	Diameter of shaft abutment
	min.194	Diameter of

Slika 7.3. Stožasti valjkasti ležaj 32930

7.4. Vratilo 4

Minimalni promjer vratila 4 dobivamo po formuli:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt1}}{10 \dots 12}, R_{dt1} - \text{vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)}$$

$$\tau_{dop} = \frac{300}{11}$$

$$\tau_{dop} = 27,273 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr4} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot 41528,12}{\pi \cdot 27,273}}$$

$$d_{vr4} = 197,94 \text{ mm}$$

Usvajamo $d_{vr4} = 200 \text{ mm}$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_4}{d_{w4}} - \text{obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 10185,95}{176,636}$$

$$F_{wt} = 115332,98 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 115332,98 \cdot \tan(21,6398)$$

$$F_r = 45756,3 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = 0,3074$$

pa je:

$$F_a = 115332,98 \cdot 0,3074$$

$$F_a = 35453,376 \text{ N}$$

Po dobivenim aksijalnim i radijalnim silama odabiremo stožasti ležaj 32948 (SKF katalog).

Trajnost ležaja izražavamo u satima i ono mora biti veće od zadane vrijednosti, a ona iznosi:

$$L_{hmin} = 97070 \text{ h} > 12000 \text{ h}$$



32948

- Popular item

Tapered roller bearings, single row

Bearing data

Tolerances,

Normal and CL7C, CLN, Normal and CL, deviating width

Bearing interfaces

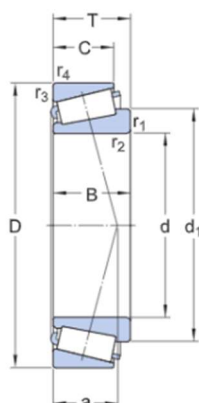
Seat tolerances for standard conditions,

Tolerances and resultant fit

Technical specification

Dimension series

4DC



DIMENSIONS

d	240 mm	Bore diameter
D	320 mm	Outside diameter
T	51 mm	Total width
d1	≈280.27 mm	Shoulder diameter of inner ring
B	51 mm	Width of inner ring
C	39 mm	Width of outer ring
r _{1,2}	min. 3 mm	Chamfer dimension of inner ring
r _{3,4}	min. 2.5 mm	Chamfer dimension of outer ring
a	64.1 mm	Distance side face to pressure point

ABUTMENT DIMENSIONS

da	max.255 mm	Diameter of shaft abutment
db	min.256 mm	Diameter of shaft abutment

7.5. Vratilo 5

Minimalni promjer vratila 5 dobivamo po formuli:

$$d_{vr5} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot T_5}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt1}}{10 \dots 12}, R_{dt1} - \text{vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)}$$

$$\tau_{dop} = \frac{300}{11}$$

$$\tau_{dop} = 27,273 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr5} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot 28684,64}{\pi \cdot 27,273}}$$

$$d_{vr5} = 172,91 \text{ mm}$$

Usvajamo $d_{vr5} = 200 \text{ mm}$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} - \text{obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 9054,1}{217,895}$$

$$F_{wt} = 83109,95 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 83109,95 \cdot \tan(21,8079)$$

$$F_r = 33254,92 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = 0,30776$$

pa je:

$$F_a = 83109,95 \cdot 0,30776$$

$$F_a = 25577,89 \text{ N}$$

Po dobivenim aksijalnim i radijalnim silama odabiremo stožasti ležaj 32948 (SKF katalog) isti kao i kod vratila 4.

Trajnost ležaja izražavamo u satima i ono mora biti veće od zadane vrijednosti, a ona iznosi:

$$L_{hmin} = 43641 \text{ h} > 12000 \text{ h}$$



32948

- Popular item

Tapered roller bearings, single row

Bearing data

Tolerances,

Normal and CL7C, CLN, Normal and CL, deviating width

Bearing interfaces

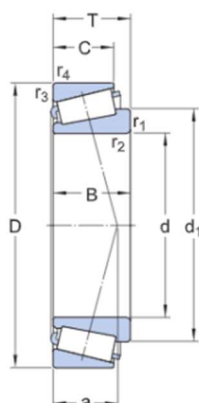
Seat tolerances for standard conditions,

Tolerances and resultant fit

Technical specification

Dimension series

4DC



DIMENSIONS

d	240 mm	Bore diameter
D	320 mm	Outside diameter
T	51 mm	Total width
d1	≈280.27 mm	Shoulder diameter of inner ring
B	51 mm	Width of inner ring
C	39 mm	Width of outer ring
r _{1,2}	min. 3 mm	Chamfer dimension of inner ring
r _{3,4}	min. 2.5 mm	Chamfer dimension of outer ring
a	64.1 mm	Distance side face to pressure point

ABUTMENT DIMENSIONS

da	max.255 mm	Diameter of shaft abutment
db	min.256 mm	Diameter of shaft abutment

Slika 7.5. Stožasti valjkasti ležaj 32948

8. Izbor pera

8.1. Vratilo 1

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

T – moment za zadano vratilo

h – visina pera

t_1 – dubina utora pera u vratilu

p_{dop} – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice), $p_{dop} = 180 \text{ Mpa}$

$$l \geq \frac{2000 \cdot 1157,6}{63 \cdot (11-7) \cdot 180}$$

$$l \geq 51,0406 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 18 \text{ mm}$$

$$h = 11 \text{ mm}$$

$$t_1 = 7 \text{ mm}$$

$$t_2 = 4,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 50 - 200 \text{ mm}$$

8.2. Vratilo 2

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

T – moment za zadano vratilo

h – visina pera

t_1 – dubina utora pera u vratilu

p_{dop} – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice), $p_{dop} = 180 \text{ Mpa}$

$$l \geq \frac{2000 \cdot 4719,4}{80 \cdot (16-10) \cdot 180}$$

$$l \geq 87,3963 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 28 \text{ mm}$$

$$h = 16 \text{ mm}$$

$$t_1 = 10 \text{ mm}$$

$$t_2 = 6,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 80 - 320 \text{ mm}$$

8.3. Vratilo 3

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

T – moment za zadano vratilo

h – visina pera

t_1 – dubina utora pera u vratilu

p_{dop} – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice), $p_{dop} = 180 \text{ Mpa}$

$$l \geq \frac{2000 \cdot 10185,95}{100 \cdot (18-11) \cdot 180}$$

$$l \geq 129,3454 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 32 \text{ mm}$$

$$h = 18 \text{ mm}$$

$$t_1 = 11 \text{ mm}$$

$$t_2 = 7,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 160 - 400 \text{ mm}$$

8.4. Vratilo 4

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

T – moment za zadano vratilo

h – visina pera

t_1 – dubina utora pera u vratilu

p_{dop} – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice), $p_{dop} = 180 \text{ Mpa}$

$$l \geq \frac{2000 \cdot 41528,712}{160 \cdot (25-15) \cdot 180}$$

$$l \geq 230,715 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 45 \text{ mm}$$

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

$$t_1 = 15 \text{ mm}$$

$$t_2 = 10,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 125 - 400 \text{ mm}$$

8.5. Vratilo 5

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

T – moment za zadano vratilo

h – visina pera

t_1 – dubina utora pera u vratilu

p_{dop} – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice), $p_{dop} = 180 \text{ Mpa}$

$$l \geq \frac{2000 \cdot 27684,64}{160 \cdot (25-15) \cdot 180}$$

$$l \geq 153,8036 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 45 \text{ mm}$$

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

$$t_1 = 15 \text{ mm}$$

$$t_2 = 10,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 125 - 400 \text{ mm}$$

9. Postupak konstruiranja reduktora

Prva faza prije konstruiranja reduktora je bio proračun momenata i brzina vrtnje na vratilima pomoću zadanih podataka. To nam je bila osnova za proračune stupnjeva. Nakon toga, svaki stupanj reduktora smo računali pojedinačno, počevši od prvog pa do trećeg stupnja. Za svaki taj stupanj je odrađen projektni i kontrolni proračun, a nakon toga su određeni promjeri vratila, odabrani ležajevi i u konačnici izabrana pera.

Kod proračuna trećeg stupnja sa manjim prijenosnim omjerom, javio nam se problem predimenzioniranosti. Naime razmak osi nam je morao ostati isti kao i kod trećeg stupnja sa većim prijenosnim omjerom, pa se i samim time pojavila predimenzioniranost zupčanika, no na to nikako nismo mogli utjecati zbog koaksijalnosti.

Također kod proračuna pera, većina nam nije zadovoljavala uvjete za vratila, ali taj problem je riješen time što smo postavili dva manja pera razmaknuta pod kutom od 120° .

Nakon prethodnih proračuna, pristupili smo odabiru sustava za podmazivanje i hlađenje. Zbog samog položaja zupčanika u zahvatu i samog kućišta kojeg smo prethodno skicirali, nismo se mogli odlučiti za klasično podmazivanje (da zupčanici budu uronjeni u ulje), nego smo se odlučili za podmazivanje ubrizgavanjem ulja. Zamislili smo da u kućištu napravimo priključak kroz koji će se provesti bakrene cijevi i kroz koje će se ulje ubrizgavati na zupčanike u zahvatu.

Druga faza je bila konstruiranje reduktora. Prvo smo krenuli od kućišta reduktora, no paralelno smo konstruirali i vratila da nam bude lakše dimenzionirati kućište. Tu smo odmah odabrali standardne elemente kao što su vijci, uljokaz, ispust ulja i odušnik. Također smo napravili i priključak za kompletan ispust ulja, a i samim time dno kućišta smo napravili pod nagibom da nam se ulje slijeva. Za materijal kućišta smo odabrali NL700, a pošto nam je sklop reduktora poprilično masivan i trpi velike topline i vibracije, odabrali smo čvrst materijal. U tijeku konstruiranja vratila odabrali smo standardne elemente kao što su radijalne brtve, o-prsteni i uskočnici, prema kojima smo dodatno oblikovali kućište.

10. Zaključak

Početak projektiranja reduktora je izračun momenata i brzina vrtnje po sva tri stupnja pomoću zadanih podataka. Svaki stupanj je proračunat pojedinačno, počevši od projektnog i kontrolnog proračuna, a poslije toga proračun promjera vratila, izbor i proračun ležaja, izbor pera te izbor ulja za podmazivanje i hlađenje. Prije projektnog proračuna svakog stupnja bira se materijal zupčanika, a kasnije i materijal vratila. Nakon gotovog proračuna, izabire se materijal i oblik kućišta, a nakon toga sustav za podmazivanje i hlađenje. Prije konstruiranja kućišta, izrađuje se skica sa raspoređenim zupčanicima i vratilima da se dobiju približne, ali i optimalne dimenzije. U tijeku konstruiranja kućišta, biraju se standardni elementi, kao što su vijci, odušnik, uljokaz i ispust ulja, a paralelno se konstruiraju vratila i biraju elementi kao što su radijalne brtve, o-prsten i uskočnici.

Trostupanjski reduktor je uspješno proračunat i konstruiran tako da zadovoljava potrebe rada u industriji, a i samim time da je njegova proizvodnja jeftina i jednostavna.

11. Popis literature

- [1] – Siminiati Dubravka, Vrcan Željko: *Proračun jednostupanjskog zupčanog reduktora, Elementi strojeva 2, Stručni studij strojarstva*
- [2] – Kraut Bojan: *Strojarski priručnik, 9. hrvatsko ili srpsko izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb*
- [3] – SKF kalkulator: [SKF Bearing Select](#)
- [4] – Jevtić N.Jovan: *Reduktori, Proračuni i konstrukcije, 2. dopunjeno izdanje, Privredni pregled, Beograd, 1976*
- [5] – Obsieger Boris: *Prijenosi sa zupčanicima, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka*

12. Sažetak

Zadani zadatak je konstruiranje trostupanjskog reduktora sa kosim zubima sa koaksijalnim izlaznim vratilima. Materijal za izradu zupčanika je Č5420, za izradu vratila Č4171, a materijal za izradu kućišta je NL700. Proračun je izrađen po stupnjevima. Treći stupanj sa manjim prijenosnim omjerom je predimenzioniran, no to je neizbježno. Pogonsko vratilo je istog materijala kao zupčanik i izrađuju se zajedno. Gonjeno vratilo i zupčanik su spojeni sa dva pera razmaknuta za 120° . Obrada zupčanika i vratila je kovanje, a daljnja obrada po potrebi je tokarenje, glodanje, brušenje i bušenje. Za podmazivanje i hlađenje zupčanika koriste se brizgaljke u obliku bakrenih cijevi, koje brizgaju ulje na zahvat zupčanika.

Ključne riječi: trostupanjski reduktor sa kosim zubima, konstruiranje, proračun, zupčanici, vratila, kućište, ležajevi, pero, moment.

12. Summary

The default task was to construct a three-stage reducer with helical teeth with coaxial output shafts. The material for the manufacture of gears is Č5420, for the manufacture of shafts Č4171, and the material for the manufacture of the case is NL700. The budget is made by degrees. The third stage with a smaller gear ratio is oversized, but this is inevitable. The drive shaft is the same material as the gear and is made together. The chased shaft and gear are connected to two keyways spaced by 120° . The processing of the gears and shafts is forging, and further processing if necessary is turning, milling, grinding and drilling. For lubrication and cooling of the gears, injectors in the form of copper pipes are used, which inject the oil to the gear grip.

Keywords: three-stage reducer with helical teeth, construction, calculation, gears, shafts, housing, bearings, keyway, torque.

13. Prilozi

1. Sklopni crtež – trostupanjski reduktor sa dva koaksijalna izlazna vratila
2. Radionički crtež donjeg dijela kućišta
3. Radionički crteži vratila
4. Gearpac ispisi