

Trostupanjski reduktor s pomoćnim izlazom

Boca, Vito

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:113515>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prediplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**TROSTUPANJSKI HORIZONTALNI REDUKTOR S
POMOĆNIM IZLAZOM**

Rijeka, svibanj 2023.

Vito Boca

0069083073

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prediplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**TROSTUPANJSKI HORIZONTALNI REDUKTOR S
POMOĆNIM IZLAZOM**

Mentor: doc.dr.sc Željko Vrcan

Rijeka, svibanj 2023.

Vito Boca

0069083073

Rijeka, 9. ožujka 2021.

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

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Vito Boca (0069083073)**
Studij: **Preddiplomski stručni studij strojarstva**

Zadatak: **Trostupanjski horizontalni reduktor s pomoćnim izlazom / Three-stage horizontal reduction gear with auxilliary output**

Opis zadatka:

Projektirati trostupanjski horizontalni reduktor za primjenu u industriji, s kosim ozubljenjem. Broj okretaja pogonskog stroja iznosi 740 min^{-1} . Prijenosni omjer $i = 63$. Snaga na izlaznom vratilu iznosi $P = 280 \text{ kW}$. Potrebno je osigurati pomoćno vratilo u ravnini s vratilom 1. stupnja koje će se okretati s 3000 min^{-1} uz priključenu snagu $P = 10 \text{ kW}$. Trajnost ležajeva je minimalno 12000 sati. Temperatura okoline iznosi najviše 40°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.

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Doc. dr. sc. Željko Vrcan

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 prof. dr. sc. Željko Vrcan.

Rijeka, svibanj 2023.

Vito Boca

0069083073

SADRŽAJ

1. Uvod.....	7
2. PRORAČUN OSNOVNIH PARAMETARA.....	8
2.1 Zadani parametri.....	8
2.2 Određivanje prijenosnih omjera	8
2.3 Određivanje brzine vrtnje vratila.....	9
2.4 Određivanje ulaznih parametara za 3. stupanj prijenosa	10
2.5 Određivanje ulaznih parametara za 2. stupanj prijenosa	11
2.6 Određivanje ulaznih parametara za 1. stupanj prijenosa	12
3. Proračun prvog stupnja reduktora	14
3.1 Izbor materijala zupčanika.....	14
3.2 Projektni proračun prvog stupnja reduktora	14
3.2.1. Razmak osi zupčastog para	14
3.2.2. Izbor modula	15
3.2.3. Broj zubi pogonskog zupčanika	16
3.2.4. Broj zubi gonjenog zupčanika.....	16
3.2.5. Točan (računski) prijenosni omjer	16
3.2.6. Diobeni promjeri	17
3.2.7. Teoretski razmak osi	17
3.2.8. Širina zupčanika	18
3.2.9. Stupanj prekrivanja koraka.....	18
3.2.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku	18
3.2.11. Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	19
3.2.12. Suma faktora pomaka profila	19
3.2.13. Ekvivalentni brojevi zuba:.....	20
3.2.14. Promjeri preko korijena zuba	21
3.2.15. Promjeri preko glave zuba.....	21

3.2.16.	Promjeri temeljnih krugova	22
3.2.17.	Promjeri pogonskih krugova	22
3.2.18.	Stupanj prekrivanja profila	23
3.2.19.	Debljina vrha zuba u normalnom presjeku	23
3.3	Kontrolni proračun prvog stupnja reduktora	26
3.3.1.	Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika	26
3.3.2.	Sigurnost na pitting	28
3.3.3.	Sigurnost protiv loma	32
3.4	Izbor ulja za podmazivanje	33
3.4.1.	Stribeckov pritisak	33
3.4.2.	Potrebna viskoznost ulja	33
4.	PRORAČUN DRUGOG STUPNJA REDUKTORA	34
4.1	Izbor materijala zupčanika	34
4.2	Projektni proračun drugog stupnja reduktora	34
4.2.1.	Razmak osi zupčastog para	34
4.2.2.	Izbor modula	35
4.2.3.	Broj zubi pogonskog zupčanika	36
4.2.4.	Broj zubi gonjenog zupčanika	36
4.2.5.	Točan (računski) prijenosni omjer	36
4.2.6.	Diobeni promjeri	37
4.2.7.	Teoretski razmak osi	37
4.2.8.	Širina zupčanika	38
4.2.9.	Stupanj prekrivanja koraka	38
4.2.10.	Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku	38
4.2.11.	Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	39
4.2.12.	Suma faktora pomaka profila	39
4.2.13.	Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku	40
4.2.14.	Promjeri preko korijena zuba	41

4.2.15.	Promjeri preko glave zuba.....	41
4.2.16.	Promjeri temeljnih krugova.....	42
4.2.17.	Promjeri pogonskih krugova.....	42
4.2.18.	Stupanj prekrivanja profila.....	43
4.2.19.	Debljina vrha zuba u normalnom presjeku.....	43
4.3	Kontrolni proračun drugog stupnja reduktora.....	46
4.3.1.	Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika.....	46
4.3.2.	Sigurnost na pitting.....	48
4.3.3.	Sigurnost protiv loma.....	52
4.4	Izbor ulja za podmazivanje.....	53
4.4.1.	Stribeckov pritisak.....	53
4.4.2.	Potrebna viskoznost ulja.....	53
5.	PRORAČUN TREĆEG STUPNJA REDUKTORA.....	54
5.1	Izbor materijala zupčanika.....	54
5.2	Projektni proračun drugog stupnja reduktora.....	54
5.2.1.	Razmak osi zupčastog para.....	54
5.2.2.	Izbor modula.....	55
5.2.3.	Broj zubi pogonskog zupčanika.....	56
5.2.4.	Broj zubi gonjenog zupčanika.....	56
5.2.5.	Točan (računski) prijenosni omjer.....	56
5.2.6.	Diobeni promjeri.....	57
5.2.7.	Teoretski razmak osi.....	57
5.2.8.	Širina zupčanika.....	58
5.2.9.	Stupanj prekrivanja koraka.....	58
5.2.10.	Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku.....	58
5.2.11.	Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku.....	59
5.2.12.	Suma faktora pomaka profila.....	59
5.2.13.	Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG.....	59

5.2.14.	Promjeri preko korijena zuba	61
5.2.15.	Promjeri preko glave zuba	61
5.2.16.	Promjeri temeljnih krugova	62
5.2.17.	Promjeri pogonskih krugova	62
5.2.18.	Stupanj prekrivanja profila	63
5.2.19.	Debljina vrha zuba u normalnom presjeku	63
5.3	Kontrolni proračun drugog stupnja reduktora	66
5.3.1.	Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika	66
5.3.2.	Sigurnost na pitting	68
5.3.3.	Sigurnost protiv loma	72
5.4	Izbor ulja za podmazivanje	73
5.4.1.	Stribeckov pritisak	73
5.4.2.	Potrebna viskoznost ulja	73
6.	PRORAČUN POMOĆNOG STUPNJA	74
6.1	Određivanje ulaznih parametara za pomoćno vratilo	74
6.2	Projektni proračun drugog stupnja reduktora	74
6.2.1.	Razmak osi zupčastog para	74
6.2.2.	Izbor modula	75
6.2.3.	Broj zubi pogonskog zupčanika	76
6.2.4.	Broj zubi gonjenog zupčanika	76
6.2.5.	Točan (računski) prijenosni omjer	77
6.2.6.	Diobeni promjeri	77
6.2.7.	Teoretski razmak osi	78
6.2.8.	Širina zupčanika	78
6.2.9.	Stupanj prekrivanja koraka	78
6.2.10.	Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku	79
6.2.11.	Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	79
6.2.12.	Suma faktora pomaka profila	79

6.2.13.	Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG	80
6.2.14.	Promjeri preko korijena zuba	81
6.2.15.	Promjeri preko glave zuba	81
6.2.16.	Promjeri temeljnih krugova	82
6.2.17.	Promjeri pogonskih krugova	82
6.2.18.	Stupanj prekrivanja profila	83
6.2.19.	Debljina vrha zuba u normalnom presjeku	83
6.3	Kontrolni proračun drugog stupnja reduktora	86
6.3.1.	Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika	86
6.3.2.	Sigurnost na pitting	88
6.3.3.	Sigurnost protiv loma	92
6.4	Izbor ulja za podmazivanje	93
6.4.1.	Stribeckov pritisak	93
6.4.2.	Potrebna viskoznost ulja	93
6.4.3.	Izbor sistema za podmazivanje	94
7.	IZBOR LEŽAJA I PROMJER VRATILA	95
7.1	Vratilo 1	95
7.2	Vratilo 2	97
7.3	Vratilo 3	99
7.4	Vratilo 4	101
7.5	Vratilo 5 – pomoćni izlaz	103
8.	IZBOR PERA	105
8.1	Vratilo 1	105
8.2	Vratilo 2	106
8.3	Vratilo 3	107
8.4	Vratilo 4	108
8.5	Vratilo 5 – pomoćno vratilo	109
9.	ZAKLJUČAK	110

10.	LITERATURA.....	111
11.	SAŽETAK.....	112
12.	SUMMARY	112
13.	PRILOZI.....	113

1. UVOD

Naš zadatak je dizajnirati horizontalni trostupanjski reduktor s pomoćnim izlazom namijenjen industrijskoj primjeni s kosim zupcima. Reduktor je uređaj koji omogućuje prilagodbu karakteristika pogonskog stroja (T, n) zahtjevima radnog stroja. U industriji se često koriste reduktori kada je potrebno smanjiti ili prilagoditi brzinu vrtnje nekog stroja, posebno kod vozila poput automobila, kamiona i brodova, kao i alatnih strojeva kao dio mjenjača ili mehaničkog prijenosnika. Za postizanje veće učinkovitosti prijenosa i smanjenja buke koja se javlja prilikom kontakta zupčanika, najčešće se koriste zupčanici s kosim ozubljenjem.

Budući da kontakt zupčanika uzrokuje trenje i zagrijavanje, važno je odabrati odgovarajući način podmazivanja zupčanika. Prvo je potrebno izračunati radne parametre za svaki pojedini stupanj reduktora, a zatim se pristupa izračunu zupčanika za svaki stupanj reduktora i vratila. Nakon izračuna svih potrebnih dijelova, vrši se odabir ležajeva, uskočnika, pera itd. Kada su svi potrebni dijelovi reduktora odabrani i izračunati, izrađuju se radionički i sklopni nacrti.

2. PRORAČUN OSNOVNIH PARAMETARA

2.1 Zadani parametri

Broj okretaja pogonskog stroja : $n = 740 \text{ min}^{-1}$

Prijenosni omjer : $i = 63$

Snaga na izlaznom vratilu : $P_{izl} = 280 \text{ kW}$

Broj okretaja pomoćnog vratila : $n = 3000 \text{ min}^{-1}$

Priključena snaga pomoćno vratila : $P_{pom} = 10 \text{ kW}$

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

Temperatura okoline : $v_z = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2 Određivanje prijenosnih omjera

Zadani prijenosni omjer potrebno je pravilno rasporediti na 3 stupnja prijenosa

Za zadani prijenosni omjer vrijedi izraz:

$$i_1 = i_2 = i_3$$

Gdje je:

i_1 – prijenosni omjer 1. stupnja, te se on računa prema izrazu

$$i_1 = \sqrt[3]{i}$$

$$i_1 = \sqrt[3]{63}$$

$$i_1 = 3,9791$$

i_2 – prijenosni omjer 2. stupnja, te se on računa prema izrazu

$$i_2 = \sqrt[3]{i}$$

$$i_2 = \sqrt[3]{63}$$

$$i_2 = 3,9791$$

i_3 – prijenosni omjer 3. stupnja, te se on računa prema izrazu

$$i_3 = \sqrt[3]{i}$$

$$i_3 = \sqrt[3]{63}$$

$$i_3 = 3,9791$$

Ukupni prijenosni omjer:

$$i_{uk} = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3$$

$$i_{uk} = 3,9791 \cdot 3,9791 \cdot 3,9791$$

$$i_{uk} = 63,002$$

Odstupanje prijenosnih omjera:

$$\Delta_i = \frac{i - i_{uk}}{i}$$

$$\Delta_i = \frac{63 - 63,002}{63}$$

$$\Delta_i = -0,0000317 = -0,00317\%$$

2.3 Određivanje brzine vrtnje vratila

Brzina vrtnje vratila br2:

$$n_2 = n_{ul} : i_1$$

$$n_2 = 740 : 3,9791$$

$$n_2 = 185,97 \text{ min}^{-1}$$

Brzina vrtnje vratila br3:

$$n_3 = n_2 = 185,97 \text{ min}^{-1}$$

Brzina vrtnje gonjenog zupčanika 1. stupnja i pogonskog zupčanika 2. stupnja su jednakije jer se zupčanici nalaze na istom vratilu.

Brzina vrtnje vratila br4:

$$n_4 = n_3 : i_3$$

$$n_4 = 185,97 : 3,9791$$

$$n_4 = 46,74 \text{ min}^{-1}$$

$n_4 = n_5$ – brzina vrtnje gonjenog zupčanika 2. stupnja o pogonskog zupčanika 3. stupnja jednake su jer se zupčanici nalaze na istom vratilu.

$$n_6 = n_5 : i_3$$

$$n_6 = 46,74 : 3,9791$$

$$n_6 = 11,74 \text{ min}^{-1}$$

2.4 Određivanje ulaznih parametara za 3. stupanj prijenosa

Izlazna snaga:

$$P_{izl} = P_6 = 280 \text{ kW}$$

Izlazni moment:

$$T_{izl} = T_6 = P_6 : \omega_6$$

Kutna brzina:

$$\omega_6 = 2\pi \cdot \frac{n_6}{60}$$

$$\omega_6 = 2\pi \cdot \frac{11,74}{60}$$

$$\omega_6 = 1,229 \text{ rad}^{-1}$$

Slijedi da je izlazni moment:

$$T_{izl} = T_6 = 280000 : 1,229$$

$$T_{izl} = T_6 = 227827,5 \text{ Nm}$$

Ulazna snaga:

$$P_5 = P_6 \cdot \eta_z$$

$\eta_z = 0,98$ – faktor iskoristivosti jednog stupnja za zupčanike sa kosim zubima

$$P_5 = 280 : 0,98$$

$$P_5 = 285,71 \text{ kW}$$

Ulazni moment:

$$T_5 = P_5 : \omega_5$$

Kutna brzina

$$\omega_5 = 2\pi \cdot \frac{n_5}{60}$$

$$\omega_5 = 2\pi \cdot \frac{46,74}{60}$$

$$\omega_5 = 4,895 \text{ rad}^{-1}$$

Slijedi da je ulazni moment:

$$T_5 = 285710 : 4,895$$

$$T_5 = 58367,72 \text{ Nm}$$

2.5 Određivanje ulaznih parametara za 2. stupanj prijenosa

Izlazna snaga i izlazni momenti:

Budući da se gonjeni zupčanik 2. stupnja i pogonski zupčanik 3. stupnja nalaze na istom vratilu snage i momenti su im jednaki.

$$P_4 = P_5 = 285,71 \text{ kW}$$

$$T_4 = T_5 = 58367,72 \text{ Nm}$$

Ulazna snaga:

$$P_3 = P_4 \cdot \eta_z$$

η_z – faktor iskoristivosti jednog stupnja za zupčanike sa kosim zubima

$$P_3 = 285,71 : 0,98$$

$$P_3 = 291,54 \text{ kW}$$

Ulazni moment:

$$T_3 = P_3 : \omega_3$$

Kutna brzina

$$\omega_3 = 2\pi \cdot \frac{n_3}{60}$$

$$\omega_3 = 2\pi \cdot \frac{185,97}{60}$$

$$\omega_3 = 19,475 \text{ rad}^{-1}$$

Slijedi da je ulazni moment:

$$T_3 = 291540 : 19,475$$

$$T_3 = 14969,97 \text{ Nm}$$

2.6 Određivanje ulaznih parametara za 1. stupanj prijenosa

Izlazna snaga i izlazni moment:

Budući da se gonjeni zupčanik 1. stupnja i pogonski zupčanik 2. stupnja nalaze na istom vratilu, snage i momenti su im jednaki.

$$P_3 = P_2 = 291,54 \text{ kW}$$

$$T_3 = T_2 = 14969,97 \text{ Nm}$$

Ulazna snaga:

$$P_1 = P_2 : \eta_z$$

η_z – faktor iskoristivosti jednog stupnja za zupčanike sa kosim zubima

$$P_1 = 291,54 : 0,98$$

$$P_1 = 297,5 \text{ kW}$$

Ulazni moment:

$$T_1 = P_1 : \omega_1$$

Kutna brzina

$$\omega_1 = 2\pi \cdot \frac{n_1}{60}$$

$$\omega_1 = 2\pi \cdot \frac{740}{60}$$

$$\omega_1 = 77,49 \text{ rad}^{-1}$$

Slijedi da je ulazni moment:

$$T_1 = 297500 : 77,49$$

$$T_1 = 3839,2 \text{ Nm}$$

3. PRORAČUN PRVOG STUPNJA REDUKTORA

Provedeno je prema (2)

3.1 Izbor materijala zupčanika

Za izradu zupčanika upotrijebiti će se materijal Č4320 sljedećih karakteristika

Tvrdoća boka zuba : 61 HRC

Toplinska obrada: cementiranje + kaljenje

Trajna dinamička čvrstoća boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1470 \text{ N/mm}^2$

Trajna dinamička čvrstoća boka zuba: $\sigma_{FE} = 860 \text{ N/mm}^2$

3.2 Projektni proračun prvog stupnja reduktora

3.2.1. Razmak osi zupčastog para

$$a \geq K_2 \cdot (i_z + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{UL}}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot \left(\frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hlim}}\right)^2} \quad (3.1)$$

$$K_2 = 320$$

$$i_z = i_{1,2,3} = 3,9791 \text{ – prijenosni omjer prvog stupnja}$$

$$T_{UL} = T_1 = 3839,2 \text{ Nm – ulazni moment}$$

Faktor širine zupčanika:

$$\psi_{bd} = 0,4 + \frac{i_z}{20} \quad (3.2)$$

$$\psi_{bd} = 0,4 + \frac{3,9791}{20}$$

$$\psi_{bd} = 0,6$$

$K_A = 1,1$ – faktor primene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja

$K_V = 1,1$ – faktor dodatnih dinamičkih opterećenja

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

$K_{H\beta} = 1,07$ – faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$s_{Hmin} = 1.2$ – minimalna sigurnost na pitting

$\sigma_{Hlim} = 1470$ MPa – trajna dinamička čvrstoća površine boka zuba

Slijedi da je razmak osi zupčastog para prvog stupnja:

$$a \geq 320 \cdot (3,9791 + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{3839,2}{0,6} \cdot \frac{3,9791 + 1}{3,9791} \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,07 \cdot \left(\frac{1,2}{1470}\right)^2}$$

$$a \geq 313,244 \text{ mm}$$

Usvojen razmak osi:

$$a = 355 \text{ mm}$$

3.2.2. Izbor modula

Normirani modul:

$$m_n \approx 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_1}{(1 \cdot i_1)^2} \tag{3.3}$$

$$m_n \approx 0,1 \cdot \frac{355 \cdot 3,9791}{(1 + 3,9791)^2}$$

$$m_n \approx 5,6978 \text{ mm}$$

Usvojeni standardni modul:

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

Kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos\beta} \tag{3.4}$$

$$\beta = 12^\circ - \text{nagib zuba}$$

$$m_t = \frac{6}{\cos 10}$$

$$m_t = 6,09$$

3.2.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

$$z_1 = \frac{2 \cdot a \cdot \cos \beta}{m_n \cdot (i_1 + 1)} \quad (3.5)$$

$$z_1 = \frac{2 \cdot 355 \cdot \cos 10}{6 \cdot (3,9791 + 1)}$$

$$z_1 = 23,4049$$

$$z_1 = 23$$

– usvojen prvi manji cijeli broj

3.2.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = i_1 \cdot z_1 \quad (3.6)$$

$$z_2 = 3,9791 \cdot 23$$

$$z_2 = 91,5193$$

$$z_2 = 92 \text{ – usvojen prvi veći broj}$$

3.2.5. Točan (računski) prijenosni omjer

$$u = i = \frac{z_2}{z_1} \quad (3.7)$$

$$u = i = \frac{92}{23}$$

$$u = i = 4$$

Odstupanje od i_1 :

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{i_1}{i}\right)$$

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{3,9791}{4}\right)$$

$\Delta_i = 0,00523$ – zadovoljava uvijet za $i < 4,5 \rightarrow \Delta_i = -0,025 \dots +0,025$

3.2.6. Diobeni promjeri

Diobeni promjer pogonskog zupčanika

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos\beta} \quad (3.8)$$

$$d_1 = \frac{6 \cdot 23}{\cos 10}$$

$$d_1 = 140,128 \text{ mm}$$

Diobeni promjer gonjenog zupčanika

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos\beta} \quad (3.9)$$

$$d_2 = \frac{6 \cdot 92}{\cos 10}$$

$$d_2 = 560,5154 \text{ mm}$$

3.2.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.10)$$

$$a_d = \frac{140,128 + 560,515}{2}$$

$$a_d = 350,322 \text{ mm}$$

$$a_d < a \rightarrow 0 < a - a_d < 5$$

$$a - a_d = 355 - 350,322 = 4,678 \text{ mm} - \text{zadovoljava}$$

3.2.8. Širina zupčanika

Širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1 \quad (3.11)$$

$$b = b_2 = 0,6 \cdot 140,128$$

$$b = b_2 = 84,0773 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 85 \text{ mm - usvojeno}$$

Širina pogonskog zupčanika:

$$b_1 = b + (2 \dots 10) \quad (3.12)$$

$$b_1 = b + 10$$

$$b_1 = 76 + 10$$

$$b_1 = 95 \text{ mm}$$

3.2.9. Stupanj prekrivanja koraka

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \cdot \sin\beta}{\pi \cdot m_n} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{85 \cdot \sin 10}{\pi \cdot 6}$$

$$\varepsilon_\beta = 0,783$$

3.2.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan\alpha_n}{\cos\beta} \right) \quad (3.14)$$

$\alpha_n = 20^\circ$ - zahvatni kut na diobenom promjeru u normalnom presjeku

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan 20}{\cos 10} \right) = 20,837^\circ$$

3.2.11. Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cdot \cos\alpha_t\right) \quad (3.15)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{350,322}{355} \cdot \cos 20,837^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 22,738$$

3.2.12. Suma faktora pomaka profila

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2 \cdot \tan\alpha_n} \cdot (z_1 + z_2) < 1,5 \quad (3.16)$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan\alpha_{wt} - \frac{\pi \cdot \alpha_{wt}}{180} \quad (3.17)$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan 22,738 - \frac{\pi \cdot 22,738}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0,0222$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan\alpha_t - \frac{\pi \cdot \alpha_t}{180} \quad (3.18)$$

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

$$\text{inv}\alpha_t = 0,0169$$

Slijedi da je suma faktora pomaka profila:

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

$$x_1 + x_2 = 0,838 < 1,5 - \text{zadovoljava uvijet}$$

Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG

$$x_1 = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{[1 - (x_1 + x_2)] \cdot \ln u}{2 \cdot \ln\left(\frac{z_{n1} + z_{n2}}{100}\right)} \quad (3.19)$$

3.2.13. Ekvivalentni brojevi zuba:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} \quad (3.20)$$

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

Kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n) \quad (3.21)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 10 \cdot \cos 20)$$

$$\beta_b = 0,003$$

Slijedi da su ekvivalentni brojevi zubi:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos 10} \quad (3.22)$$

$$Z_{n1} = \frac{23}{\cos^2 10 \cdot \cos 10}$$

$Z_{n1} = 23,355$ - ekvivalentni broj zubi pogonskog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos 10} \quad (3.23)$$

$$Z_{n2} = \frac{92}{\cos^2 0,003 \cdot \cos 10}$$

$$Z_{n2} = 93,419$$

Slijedi da je raspodjela sume faktora pomaka profila:

$$x_1 = \frac{0,2295602 - 0,184605}{2} + \frac{[1 - (0,229560 - 0,184605)] \cdot \ln 3,96}{2 \cdot \ln \cdot \left(\frac{23,355 + 93,419}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,4555$$

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

$$x_2 = 0,3828$$

3.2.14. Promjeri preko korijena zuba

Promjeri preko korijena zuba:

$$d_{f1} = m_n \cdot \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2 \cdot x_1 - 2,5 \right) \quad (3.24)$$

$$d_{f1} = 6 \cdot \left(\frac{23}{\cos 10} + 2 \cdot 0,4555 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 130,595 \text{ mm}$$

Promjeri preko korijena zuba gonjenog zupčanika:

$$d_{f2} = m_n \cdot \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2 \cdot x_2 - 2,5 \right) \quad (3.25)$$

$$d_{f2} = 6 \cdot \left(\frac{92}{\cos 10} + 2 \cdot 0,3828 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 550,110 \text{ mm}$$

3.2.15. Promjeri preko glave zuba

Promjeri preko glave zuba pogonskog zupčanika:

$$d_{a1} = 2 \cdot a - d_{f2} - 0,5 \cdot m_n \quad (3.26)$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 355 - 550,110 - 0,5 \cdot 6$$

$$d_{a1} = 156,890 \text{ mm}$$

$$d_{a1} = 156 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

Promjeri preko glave zuba gonjenog zupčanika:

$$d_{a2} = 2 \cdot a - d_{f1} - 0,5 \cdot m_n \quad (3.27)$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 355 - 130,595 - 0,5 \cdot 6$$

$$d_{a2} = 576,405 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 576 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

3.2.16. Promjeri temeljnih krugova

Promjer temeljnog kruga pogonskog zupčanika:

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_t \quad (3.28)$$

$$d_{b1} = 140,1288 \cdot \cos 20,837$$

$$d_{b1} = 131,678 \text{ mm}$$

Promjer temeljnog kruga gonjenog zupčanika:

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_t \quad (3.29)$$

$$d_{b2} = 560,515 \cdot \cos 20,837$$

$$d_{b2} = 526,721 \text{ mm}$$

3.2.17. Promjeri pogonskih krugova

Promjer pogonskog kruga pogonskog zupčanika

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot a}{i+1} \quad (3.30)$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 355}{3,9791 + 1}$$

$$d_{w1} = 142 \text{ mm}$$

Promjer pogonskog kruga gonjenog zupčanika:

$$d_{w2} = 2 \cdot a - d_{w1} \quad (3.31)$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 355 - 142$$

$$d_{w2} = 568 \text{ mm}$$

3.2.18. Stupanj prekrivanja profila

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2 \cdot a \cdot \sin a_{wt}}{2 \cdot \pi \cdot m_t \cdot \cos a_t} \quad (3.32)$$

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{156^2 - 131,678^2} + \sqrt{576^2 - 526,712^2} - 2 \cdot 355 \cdot \sin 20,94}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot \cos 20,837}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1,184$$

$$\varepsilon_{\alpha} > 1,1 \rightarrow 1,184 > 1,1 - \text{zadovoljava uvjet}$$

3.2.19. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Debljina vrha zuba u normalnom presjeku pogonskog zupčanika:

$$S_{an1} = d_{a1} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot x_1 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cdot \cos \beta_{a1} \quad (3.33)$$

Kut zahvata na vrhu zuba:

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}} \quad (3.34)$$

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{131,678}{156}$$

$$\alpha_{at1} = 32,933$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \cdot \tan \beta \right) \quad (3.35)$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{156}{140,128} \cdot \tan 10 \right)$$

$$\beta_{a1} = 11,1676$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \cdot \alpha_{at1}}{180} \quad (3.36)$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan 32,933 - \frac{\pi \cdot 32,933}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = 0,07296286$$

Slijedi da je debljina vrha zuba pogonskog zupčanika u normalnom presjeku:

$$S_{an1} = 156 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,4555 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_1} + 0,01692 - 0,072962 \right) \cdot \cos 11,167$$

$$S_{an1} = 4,2078 \text{ mm}$$

Relativna debljina vrha zuba pogonskog zuočanika:

$$S_{an1}^* = \frac{S_{an1}}{m_n} \quad (3.37)$$

$$S_{an1}^* = \frac{3,6462}{6}$$

$$S_{an1}^* = 0,7$$

$$S_{an1}^* > 0,4 \rightarrow 0,7 > 0,4 - \text{zadovoljavan uvijet}$$

Debljina vrha zuba u normalnom presjeku gonjenog zupčanika:

$$S_{an2} = d_{a2} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot x_2 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cdot \cos \beta_{a2} \quad (3.38)$$

Kut zahvata na vrhu zuba:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}} \quad (3.39)$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{526,712}{576}$$

$$\alpha_{at2} = 23,965$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \cdot \tan \beta \right) \quad (3.40)$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{576}{560,51} \cdot \tan 10 \right)$$

$$\beta_{a2} = 10,277$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \cdot a_{at2}}{180} \quad (3.41)$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{at2} = \tan 23,965 - \frac{\pi \cdot 23,965}{180}$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{at2} = 0,02623$$

Slijedi da je debljina vrha zuba pogonskog zupčanika u normalnom presjeku:

$$S_{an2} = 560,51 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,3828 \cdot \tan 20}{2 \cdot 25} + 0,0169 - 0,02623 \right) \cdot \cos 10,277$$

$$S_{an2} = 6,125 \text{ mm}$$

Relativna debljina vrha zuba pogonskog zuočanika:

$$S_{an2}^* = \frac{S_{an2}}{m_n} \quad (3.42)$$

$$S_{an2}^* = \frac{6,125}{6}$$

$$S_{an2}^* = 1,02$$

$$S_{an2}^* > 0,4 \rightarrow 1,02 > 0,4 - \text{zadovoljavan uvijet}$$

3.3 Kontrolni proračun prvog stupnja reduktora

3.3.1. Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika

$$\sigma_H = Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\beta \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (3.43)$$

Faktor modula elastičnosti za čelik:

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

Faktor zone:

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} \quad (3.44)$$

$$Z_H = \frac{1}{\cos 20,837} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos 0,003}{\tan 22,738}}$$

$$Z_H = 2,337$$

Faktor nagiba zuba:

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} \quad (3.45)$$

$$Z_\beta = \sqrt{\cos 10}$$

$$Z_\beta = 0,992$$

Faktor utjecanja prekrivanja:

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}} \quad (3.46)$$

$$Z_\varepsilon = 0,92$$

Tangencijalna sila:

$$F_t = \frac{2000 \cdot T_1}{d_1} \quad (3.47)$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 3839,2}{140,128}$$

$$F_t = 54795,274 \text{ N}$$

Faktor primjene:

$$K_A = 1,1$$

Obodna brzina zupčanika:

$$v_1 = \frac{d_1 \cdot n_1}{19100} \quad (3.48)$$

$$v_1 = \frac{140,128 \cdot 740}{19100}$$

$$v_1 = 5,429 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja nastalih netočnošću izrade:

$$K_{V\beta} = 1 + Q^2 \cdot v_1 \cdot z_1 \cdot 10^{-5} \quad (3.49)$$

$$K_{V\beta} = 1 + 6^2 \cdot 5,429 \cdot 23 \cdot 10^{-5}$$

$$K_{V\beta} = 1,044$$

$$K_{Va} = 1 + 1,8 \cdot Q^2 \cdot v_1 \cdot z_1 \cdot 10^{-5} \quad (3.50)$$

$$K_{Va} = 1 + 1,8 \cdot 6^2 \cdot 5,429 \cdot 23 \cdot 10^{-5}$$

$$K_{Va} = 1,044$$

$$K_V = K_{Va} - \varepsilon_\beta \cdot (K_{Va} - K_{V\beta}) \quad (3.51)$$

$$K_V = 1,08 - 0,84 \cdot (1,08 - 1,044)$$

$$K_V = 1,044$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu:

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

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba:

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left(\frac{b}{d_1}\right) + 0,0005b \quad (3.52)$$

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left(\frac{85}{140,128}\right) + 0,0005 \cdot 85$$

$$K_{H\beta} = 1,2787$$

Slijedi da je kontaktni pritisak na bokovima spregnutih zupčanika:

$$\sigma_H = 190 \sqrt{\text{Mpa}} \cdot 2,44 \cdot 0,99 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{\frac{54795,274}{85 \cdot 140,128} \cdot \frac{3,9791+1}{3,9791} \cdot 1,1 \cdot 1,044 \cdot 1,1 \cdot 1,2787}$$

$$\sigma_H = 1235,172 \text{ MPa}$$

3.3.2. Sigurnost na pitting

$$S_H = \frac{\sigma_{hlim}}{\sigma_H} \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R \cdot Z_X \cdot Z_W > S_{Hmin} \quad (3.53)$$

Minimalna sigurnost na pitting:

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

Trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320:

$$\sigma_{hlim} = 1470 \text{ N/mm}^2$$

Hidroelastični – tribomehanički faktor:

$$Z_L Z_V Z_R = Z_{LVR}$$

Z_L – utjecaj maziva

Z_V – utjecaj brzine

Z_R – utjecaj hrapavosti boka

$Z_{LVR} = 1$ – za brušene zupčanike

Faktor povećanja tvrdoće:

$$Z_W = 1$$

Faktor utjecanja veličine:

$$Z_X = 1$$

Slijedi da je sigurnost na pitting:

$$S_H = \frac{1470}{123,172} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_H = 1,19 > 1,2 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Nosivost korijena zuba:

Naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = \frac{F_t}{b_1 \cdot m_n} \cdot Y_{FS1} \cdot Y_\beta \cdot Y_\varepsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (3.54)$$

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$Y_{FS1} \approx 4,8 + 0,18 \cdot x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \cdot \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

Fiktivni broj zuba pogonskog zupčanika:

$$Z_{n1} \approx \frac{z_1}{\cos^3 \beta} \quad (3.55)$$

$$Z_{n1} \approx \frac{23}{\cos^3 10}$$

$$Z_{n1} \approx 24,5$$

Slijedi da je faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$Y_{FS1} \approx 4,8 + 0,18 \cdot 0,455^2 + \frac{7,63}{23,355} - 15,94 \cdot \frac{0,455}{23,355}$$

$$Y_{FS1} \approx 4,132$$

Faktor kuta nagiba:

$$Y_\beta = 1 - \frac{\varepsilon_\beta \cdot \beta}{120} \quad (3.56)$$

$$Y_\beta = 1 - \frac{0,783 \cdot 10}{120}$$

$$Y_\beta = 0,93474$$

Faktor stupnja prekrivanja profila:

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_\alpha} \quad (3.57)$$

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2 10}{\varepsilon_\alpha}$$

$$Y_\varepsilon = 0,8644$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu:

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

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba:

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} \quad (3.58)$$

$$K_{F\beta} = 1,2783^{0,9}$$

$$K_{F\beta} = 1,2476$$

Slijedi da je naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = \frac{F_t}{b_1 \cdot m_n} \cdot Y_{FS1} \cdot Y_\beta \cdot Y_\varepsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (3.59)$$

$$\sigma_{F1} = 533,098 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = \frac{F_t}{b_2 \cdot m_n} \cdot Y_{FS2} \cdot Y_\beta \cdot Y_\varepsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$Y_{FS2} \approx 4,8 + 0,18 \cdot x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \cdot \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

Fiktivni broj zuba gonjenog zupčanika:

$$Z_{n2} \approx \frac{z_2}{\cos^3 \beta} \quad (3.60)$$

$$Z_{n2} \approx \frac{92}{\cos^3 12}$$

$$Z_{n2} \approx 96,323$$

Slijedi da je faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$Y_{FS2} \approx 4,8 + 0,18 \cdot 0,3828 + \frac{7,63}{96,923} - 15,94 \cdot \frac{0,3828}{96,323}$$

$$Y_{FS2} \approx 4,1222$$

Slijedi da je naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = \frac{F_t}{b_2 \cdot m_n} \cdot Y_{FS2} \cdot Y_\beta \cdot Y_\varepsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}$$

$$\sigma_{F2} = 594,35 \text{ N/mm}^2$$

3.3.3. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma pogonskog zupčanika:

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_{F1}} \cdot Y_\delta \cdot Y_R \cdot Y_X \geq S_{Fmin} \quad (3.61)$$

$\sigma_{FE} = 860 \text{ N/mm}^2$ – dinamička čvrtoća korijena zuba za materijal Č4320

$\sigma_{F1} = 533,098 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika

$Y_\delta \approx 1$ – faktor osjetljivosti materijala na koncentraciju naprezanja

$Y_R = 1$ – utjecaj hrapavosti prijelanog dijela korijena zuba

$Y_X = 1$ – faktor veličine zupčanika

$S_{Fmin} = 1,1$ - minimalna sigurnost na pitting

Slijedi da je sigurnost protiv loma pogonskog zupčanika:

$$S_{F1} = \frac{860}{533,098} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,2$$

$S_{F1} = 1,613 > 1,2$ – zadovoljava uvjet

Sigurnost protiv loma gonjenog zupčanika:

$$S_{F2} = \frac{860}{\sigma_{F2}} \cdot Y_\delta \cdot Y_R \cdot Y_X \geq S_{Fmin} \quad (3.62)$$

Slijedi da je sigurnost protiv loma gonjenog zupčanika:

$$S_{F2} = \frac{860}{594,35} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,2$$

$S_{F2} = 1,4469 > 1,2$ – zadovoljava uvjet

3.4 Izbor ulja za podmazivanje

3.4.1. Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3 \cdot F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \quad (3.63)$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 54795,274}{85 \cdot 140,128} \cdot \frac{3,9791+1}{3,9791}$$

$$k_s = 17,251 \text{ MPa}$$

3.4.2. Potrebna viskoznost ulja

$$v_{40} = 208 \cdot \left(\frac{k_s}{v} \right)^{0,418} \quad (3.64)$$

$$v_{40} = 208 \cdot \left(\frac{17,251}{5,43} \right)^{0,418}$$

$$v_{40} = 337,242 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Prvi stupanj zahtijeva podmazivanje uljem minimalnog viskoziteta od 337 mm²/s. Nakon izračuna podataka za preostala dva stupnja, odrediti će se vrsta ulja koja će zadovoljiti potrebe svih stupnjeva.

4. PRORAČUN DRUGOG STUPNJA REDUKTORA

Provedeno je prema (2)

4.1 Izbor materijala zupčanika

Za izradu zupčanika upotrijebiti će se materijal Č4320 sljedećih karakteristika

Tvrdoća boka zuba : 61 HRC

Toplinska obrada: cementiranje + kaljenje

Trajna dinamička čvrstoća boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1470 \text{ N/mm}^2$

Trajna dinamička čvrstoća boka zuba: $\sigma_{FE} = 860 \text{ N/mm}^2$

4.2 Projektni proračun drugog stupnja reduktora

4.2.1. Razmak osi zupčastog para

$$a \geq K_2 \cdot (i_z + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{UL}}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot \left(\frac{s_{Hmin}}{\sigma_{Hlim}}\right)^2} \quad (4.1)$$

$$K_2 = 320$$

$i_z = i_2 = 3,9791$ – prijenosni omjer drugog stupnja

$T_{UL} = T_2 = 14969,97 \text{ Nm}$ – ulazni moment

Faktor širine zupčanika:

$$\psi_{bd} = 0,4 + \frac{i_z}{20} \quad (4.2)$$

$$\psi_{bd} = 0,4 + \frac{3,9791}{20}$$

$$\psi_{bd} = 0,6$$

$K_A = 1,1$ – faktor primene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja

$K_V = 1,1$ – faktor dodatnih dinamičkih opterećenja

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

$K_{H\beta} = 1,07$ – faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$s_{Hmin} = 1.1$ – minimalna sigurnost na pitting

$\sigma_{Hlim} = 1470$ MPa – trajna dinamička čvrstoća površine boka zuba

Slijedi da je razmak osi zupčastog para drugog stupnja:

$$a \geq 320 \cdot (3,9791 + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{14969,97}{0,6} \cdot \frac{3,9791 + 1}{3,9791} \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,07 \cdot \left(\frac{1,1}{1470}\right)^2}$$

$$\alpha \geq 465,28 \text{ mm}$$

Usvojen razmak osi:

$$\alpha = 500 \text{ mm}$$

4.2.2. Izbor modula

Normirani modul:

$$m_n \approx 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_2}{(1 \cdot i_2)^2} \tag{4.3}$$

$$m_n \approx 0,1 \cdot \frac{500 \cdot 3,9791}{(1 \cdot 3,9791)^2}$$

$$m_n \approx 8,02515 \text{ mm}$$

Usvojeni standardni modul:

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

4.2.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

$$z_1 = \frac{2 \cdot a \cdot \cos \beta}{m_n \cdot (i_2 + 1)} \quad (4.4)$$

$$z_1 = \frac{2 \cdot 500 \cdot \cos 20}{9 \cdot (3,9791 + 1)}$$

$$z_1 = 20,9697$$

$z_1 = 21$ – usvojen prvi veći cijeli broj

4.2.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = i_2 \cdot z_1 \quad (4.5)$$

$$z_2 = 3,9791 \cdot 21$$

$$z_2 = 83,5611$$

$z_2 = 83$ – usvojen prvi manji broj radi lakšeg rješavanja korekcije zupčanika

4.2.5. Točan (računski) prijenosni omjer

$$u = i = \frac{z_2}{z_1} \quad (4.6)$$

$$u = i = \frac{83}{21}$$

$$u = i = 3,95238$$

Odstupanje od i_1 :

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{i_2}{i}\right) \quad (4.7)$$

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{3,9791}{3,95238}\right)$$

$\Delta_i = -0,00676$ – zadovoljava uvijet za $i < 4,5 \rightarrow \Delta_i = -0,025 \dots +0,02$

4.2.6. Diobeni promjeri

Diobeni promjer pogonskog zupčanika

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta} \quad (4.8)$$

$$d_1 = \frac{9 \cdot 21}{\cos 20}$$

$$d_1 = 201,1295 \text{ mm}$$

Diobeni promjer gonjenog zupčanika

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta} \quad (4.9)$$

$$d_2 = \frac{9 \cdot 83}{\cos 12}$$

$$d_2 = 794,94 \text{ mm}$$

4.2.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4.10)$$

$$a_d = \frac{201,1295 + 794,94}{2}$$

$$a_d = 498,035$$

$$a_d < a \rightarrow 0 < a - a_d < 5$$

$$a - a_d = 1,965$$

4.2.8. Širina zupčanika

Širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1 \quad (4.11)$$

$$b = b_2 = 0,6 \cdot 201,129$$

$$b = b_2 = 120,677$$

$$b = b_2 = 150 \quad - \text{usvojeno}$$

Širina pogonskog zupčanika:

$$b_1 = b + (2 \dots 10) \quad (4.12)$$

$$b_1 = 150 + 5$$

$$b_1 = 155 \text{ mm}$$

4.2.9. Stupanj prekrivanja koraka

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \cdot \sin\beta}{\pi \cdot m_n} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{150 \cdot \sin 20}{\pi \cdot 9}$$

$$\varepsilon_\beta = 1,8144$$

4.2.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan\alpha_n}{\cos\beta} \right) \quad (4.14)$$

$\alpha_n = 20^\circ$ - zahvatni kut na diobenom promjeru u normalnom presjeku

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan 20}{\cos 20} \right) = 21,172^\circ$$

4.2.11. Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cdot \cos\alpha_t\right) \quad (4.15)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{498,035}{500} \cdot \cos 20,837^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 21,421$$

4.2.12. Suma faktora pomaka profila

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2 \cdot \tan\alpha_n} \cdot (z_1 + z_2) < 1,5 \quad (4.16)$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan 21,421 - \frac{\pi \cdot 21,421}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0,01845$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan \alpha_t - \frac{\pi \cdot \alpha_t}{180} \quad (4.17)$$

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

$$\text{inv}\alpha_t = 0,016929$$

Slijedi da je suma faktora pomaka profila:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,01845 - 0,016929}{2 \cdot \tan 20} \cdot (21 + 83) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,2174 < 1,5 - \text{zadovoljava uvijet}$$

4.2.13. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku

$$x_1 = \frac{x_1+x_2}{2} + \frac{[1-(x_1+x_2)] \cdot \ln u}{2 \cdot \ln \left(\frac{Z_{n1}+Z_{n2}}{100} \right)} \quad (4.18)$$

Ekvivalentni brojevi zuba:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} \quad (4.19)$$

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

Kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n) \quad (4.20)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 20 \cdot \cos 20)$$

$$\beta_b = 0,006$$

Slijedi da su ekvivalentni brojevi zubi:

$$Z_{n1} = \frac{21}{\cos^2 0,006 \cdot \cos 20}$$

$Z_{n1} = 21,9595$ - ekvivalentni broj zubi pogonskog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{83}{\cos^2 0,006 \cdot \cos 20}$$

$Z_{n2} = 90,975$ - ekvivalentni broj zubi gonjenog zupčanika

Slijedi da je raspodjela sume faktora pomaka profila:

$$x_1 = \frac{0,2174}{2} + \frac{[1 - (0,2174)] \cdot \ln 3,9523}{2 \cdot \ln \left(\frac{21,9595 + 90,975}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,2883$$

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

$$x_2 = -0,07087$$

4.2.14. Promjeri preko korijena zuba

Promjeri preko korijena zuba:

$$d_{f1} = m_n \cdot \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2 \cdot x_1 - 2,5 \right) \quad (4.21)$$

$$d_{f1} = 9 \cdot \left(\frac{21}{\cos 20} + 2 \cdot 0,2883 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 183,819 \text{ mm}$$

Promjeri preko korijena zuba gonjenog zupčanika:

$$d_{f2} = m_n \cdot \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2 \cdot x_2 - 2,5 \right) \quad (4.22)$$

$$d_{f2} = m_n \cdot \left(\frac{83}{\cos 20} + 2 \cdot (-0,07087) - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 771,165 \text{ mm}$$

4.2.15. Promjeri preko glave zuba

Promjeri preko glave zuba pogonskog zupčanika:

$$d_{a1} = 2 \cdot a - d_{f2} - 0,5 \cdot m_n \quad (4.23)$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 500 - 771,165 - 0,5 \cdot 9$$

$$d_{a1} = 224,335 \text{ mm}$$

$$d_{a1} = 224,5 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

Promjeri preko glave zuba gonjenog zupčanika:

$$d_{a2} = 2 \cdot a - d_{f1} - 0,5 \cdot m_n \quad (4.24)$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 500 - 183,819 - 0,5 \cdot 9$$

$$d_{a2} = 811,681 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 811,5 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

4.2.16. Promjeri temeljnih krugova

Promjer temeljnog kruga pogonskog zupčanika:

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_t \quad (4.25)$$

$$d_{b1} = 201,129 \cdot \cos 20,837$$

$$d_{b1} = 189 \text{ mm}$$

Promjer temeljnog kruga gonjenog zupčanika:

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_t \quad (4.26)$$

$$d_{b2} = 794,94 \cdot \cos 20,837$$

$$d_{b2} = 747 \text{ mm}$$

4.2.17. Promjeri pogonskih krugova

Promjer pogonskog kruga pogonskog zupčanika

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot a}{i+1} \quad (4.27)$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 500}{3,9791 + 1}$$

$$d_{w1} = 201,923 \text{ mm}$$

Promjer pogonskog kruga gonjenog zupčanika:

$$d_{w2} = 2 \cdot a - d_{w1} \quad (4.28)$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 500 - 201,923$$

$$d_{w2} = 798,077 \text{ mm}$$

4.2.18. Stupanj prekrivanja profila

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2 \cdot a \cdot \sin a_{wt}}{2 \cdot \pi \cdot m_t \cdot \cos a_t} \quad (4.29)$$

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{224,5^2 - 198^2} + \sqrt{811,5^2 - 747^2} - 2 \cdot 500 \cdot \sin 21,42}{2 \cdot \pi \cdot 9,577 \cdot \cos 20,837}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1,291$$

$$\varepsilon_{\alpha} > 1,1 \rightarrow 1,291 > 1,1 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Ukupno prekrivanje:

$$\varepsilon_{\gamma} = \varepsilon_{\alpha} + \varepsilon_{\beta} \quad (4.30)$$

$$\varepsilon_{\gamma} = 1,291 + 1,8144$$

$$\varepsilon_{\gamma} = 3,1054$$

4.2.19. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Debljina vrha zuba u normalnom presjeku pogonskog zupčanika:

$$S_{an1} = d_{a1} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot x_1 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_1} + \text{inva}_t - \text{inva}_{at1} \right) \cdot \cos \beta_{a1} \quad (4.31)$$

Kut zahvata na vrhu zuba:

$$a_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}} \quad (4.32)$$

$$a_{at1} = \arccos \frac{189}{224,5}$$

$$a_{at1} = 32,5959$$

$$\beta_{a1} = \arctan\left(\frac{d_{a1}}{d_1} \cdot \tan \beta\right) \quad (4.33)$$

$$\beta_{a1} = \arctan\left(\frac{224,5}{201,129} \cdot \tan 20\right)$$

$$\beta_{a1} = 22,095$$

$$\text{inv}\alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \cdot \alpha_{at1}}{180} \quad (4.34)$$

$$\text{inv}\alpha_{at1} = \tan 32,5959 - \frac{\pi \cdot 32,5959}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{at1} = 0,0705207$$

Slijedi da je debljina vrha zuba pogonskog zupčanika u normalnom presjeku:

$$S_{an1} = 224,5 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,2883 \cdot \tan 20}{2 \cdot 21} + \text{inv}20,837 - 0,0705207 \right) \cdot \cos 22,095$$

$$S_{an1} = 6,4854 \text{ mm}$$

Relativna debljina vrha zuba pogonskog zuočanika:

$$S_{an1}^* = \frac{S_{an1}}{m_n} \quad (4.35)$$

$$S_{an1}^* = \frac{6,48548}{9}$$

$$S_{an1}^* = 0,7206088$$

$$S_{an1}^* > 0,4 \rightarrow 0,72 > 0,4 - \text{zadovoljavan uvijet}$$

Debljina vrha zuba u normalnom presjeku gonjenog zupčanika:

$$S_{an2} = d_{a2} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot x_2 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_2} + \text{inv}\alpha_t - \text{inv}\alpha_{at2} \right) \cdot \cos \beta_{a2} \quad (4.36)$$

Kut zahvata na vrhu zuba:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}} \quad (4.37)$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{747}{811,5}$$

$$\alpha_{at2} = 23,0282$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \cdot \tan \beta \right) \quad (4.38)$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{224,5}{794,94} \cdot \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a2} = 20,3868$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \cdot \alpha_{at2}}{180} \quad (4.39)$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan 23,0282 - \frac{\pi \cdot 23,0282}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = 0,07052$$

Slijedi da je debljina vrha zuba pogonskog zupčanika u normalnom presjeku:

$$S_{an2} = 811,5 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot (-0,0708) \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot 83} + 0,016929 - 0,18450 \right) \cdot \cos 20,3868$$

$$S_{an2} = 9,2022 \text{ mm}$$

Relativna debljina vrha zuba pogonskog zuočanika:

$$S_{an2}^* = \frac{S_{an2}}{m_n} \quad (4.40)$$

$$S_{an2}^* = \frac{9,2022}{9}$$

$$S_{an2}^* = 1,0225$$

$S_{an2}^* > 0,4 \rightarrow 1,0225 > 0,4$ – zadovoljavan uvijet

4.3 Kontrolni proračun drugog stupnja reduktora

4.3.1. Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika

$$\sigma_H = Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\beta \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (4.41)$$

Faktor modula elastičnosti za čelik:

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

Faktor zone:

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} \quad (4.42)$$

$$Z_H = \frac{1}{\cos 20,837} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos 0,006}{\tan 21,421}}$$

$$Z_H = 2,4158$$

Faktor nagiba zuba:

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} \quad (4.43)$$

$$Z_\beta = \sqrt{\cos 20}$$

$$Z_\beta = 0,9693$$

Faktor utjecanja prekrivanja:

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}} \quad (4.44)$$

$$Z_\varepsilon = 0,88$$

Tangencijalna sila:

$$F_t = \frac{2000 \cdot T_1}{d_1} \quad (4.45)$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 14969,97}{201,129}$$

$$F_t = 148858,945 \text{ N}$$

Faktor primjene:

$$K_A = 1,1$$

Obodna brzina zupčanika:

$$v_1 = \frac{d_1 \cdot n_1}{19100} \quad (4.46)$$

$$v_1 = \frac{201,129 \cdot 185,97}{19100}$$

$$v_1 = 1,958 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih napreznja nastalih netočnošću izrade:

$$K_{V\beta} = 1 + Q^2 \cdot v_1 \cdot z_1 \cdot 10^{-5} \quad (4.47)$$

$$K_{V\beta} = 1 + 7^2 \cdot 1,958 \cdot 21 \cdot 10^{-5}$$

$$K_{V\beta} = 1,02$$

$$K_{Va} = 1 + 1,8 \cdot Q^2 \cdot v_1 \cdot z_1 \cdot 10^{-5} \quad (4.48)$$

$$K_{Va} = 1 + 1,8 \cdot 7^2 \cdot 1,958 \cdot 21 \cdot 10^{-5}$$

$$K_{Va} = 1,0363$$

$$K_V = K_{Va} - \varepsilon_\beta \cdot (K_{Va} - K_{V\beta}) \quad (4.49)$$

$$K_V = 1,0363 - 1,8144 \cdot (1,0363 - 1,02)$$

$$K_V = 1,02$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu:

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

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba:

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left(\frac{b}{d_1}\right) + 0,0005b \quad (4.50)$$

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left(\frac{150}{201,129}\right) + 0,0005 \cdot 150$$

$$K_{H\beta} = 1,345$$

Slijedi da je kontaktni pritisak na bokovima spregnutih zupčanika:

$$\sigma_H = 190\sqrt{MPa} \cdot 2,415 \cdot 0,9693 \cdot 0,88 \cdot \sqrt{\frac{148858,945}{150 \cdot 201,129} \cdot \frac{3,9791+1}{3,9791} \cdot 1,1 \cdot 1,02 \cdot 1,1 \cdot 1,345}$$

$$\sigma_H = 1254,766 \text{ MPa}$$

4.3.2. Sigurnost na pitting

$$S_H = \frac{\sigma_{hlim}}{\sigma_H} \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R \cdot Z_X \cdot Z_W > S_{Hmin} \quad (4.51)$$

Minimalna sigurnost na pitting:

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

Trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320:

$$\sigma_{hlim} = 1470 \text{ N/mm}^2$$

Hidroelastični – tribomehanički faktor:

$$Z_L Z_V Z_R = Z_{LVR}$$

Z_L – utjecaj maziva

Z_V – utjecaj brzine

Z_R – utjecaj hrapavosti boka

$Z_{LVR} = 1$ – za brušene zupčanike

Faktor povećanja tvrdoće:

$$Z_W = 1$$

Faktor utjecanja veličine:

$$Z_X = 1$$

Slijedi da je sigurnost na pitting:

$$S_H = \frac{1470}{1254,766} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$S_H = 1,17 > 1,1$ – zadovoljava uvjet

Nosivost korijena zuba:

Naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = \frac{F_t}{b_1 \cdot m_n} \cdot Y_{FS1} \cdot Y_\beta \cdot Y_\varepsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (4.52)$$

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$Y_{FS1} \approx 4,8 + 0,18 \cdot x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \cdot \frac{x_1}{Z_{n1}} \quad (4.53)$$

Fiktivni broj zuba pogonskog zupčanika:

$$Z_{n1} \approx \frac{z_1}{\cos^3 \beta} \quad (4.54)$$

$$Z_{n1} \approx \frac{21}{\cos^3 20}$$

$$Z_{n1} \approx 25,2717$$

Slijedi da je faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$Y_{FS1} \approx 4,8 + 0,18 \cdot 0,2883^2 + \frac{7,63}{25,2717} - 15,94 \cdot \frac{0,2883}{25,2717}$$

$$Y_{FS1} \approx 4,2150$$

Faktor kuta nagiba:

$$Y_\beta = 1 - \frac{\varepsilon_\beta \cdot \beta}{120} \quad (4.55)$$

$$Y_\beta = 1 - \frac{1,8145 \cdot 20}{120}$$

$$Y_\beta = 0,6975$$

Faktor stupnja prekrivanja profila:

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_\alpha} \quad (4.56)$$

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2 20}{1,291}$$

$$Y_\varepsilon = 0,76303$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu:

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

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba:

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} \quad (4.57)$$

$$K_{F\beta} = 1,345^{0,9}$$

$$K_{F\beta} = 1,306$$

Slijedi da je naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = \frac{148858,945}{155 \cdot 9} \cdot 4,215 \cdot 0,6975 \cdot 0,76303 \cdot 1,1 \cdot 1,020 \cdot 1,1 \cdot 1,3058$$

$$\sigma_{F1} = 416,108 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = \frac{F_t}{b_2 \cdot m_n} \cdot Y_{FS2} \cdot Y_\beta \cdot Y_\varepsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (4.58)$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$Y_{FS2} \approx 4,8 + 0,18 \cdot x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \cdot \frac{x_2}{Z_{n2}} \quad (4.59)$$

Fiktivni broj zuba gonjenog zupčanika:

$$Z_{n2} \approx \frac{z_2}{\cos^3 \beta} \quad (4.60)$$

$$Z_{n2} \approx \frac{83}{\cos^3 20}$$

$$Z_{n2} \approx 100,704$$

Slijedi da je faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$Y_{FS2} \approx 4,8 + 0,18 \cdot (-0,0708)^2 + \frac{7,63}{100,704} - 15,94 \cdot \frac{-0,0708}{100,704}$$

$$Y_{FS2} \approx 4,167$$

Slijedi da je naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = \frac{148858,945}{155 \cdot 9} \cdot 4,167 \cdot 0,697 \cdot 0,763 \cdot 1,1 \cdot 1,02 \cdot 1,1 \cdot 1,305$$

$$\sigma_{F2} = 425,168 \text{ N/mm}^2$$

4.3.3. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma pogonskog zupčanika:

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_{F1}} \cdot Y_{\delta} \cdot Y_R \cdot Y_X \geq S_{Fmin} \quad (4.61)$$

$\sigma_{FE} = 860 \text{ N/mm}^2$ – dinamička čvrtoća korijena zuba za materijal Č4320

$\sigma_{F1} = 416,108 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika

$Y_{\delta} \approx 1$ – faktor osjetljivosti materijala na koncentraciju naprezanja

$Y_R = 1$ – utjecaj hrapavosti prijelanog dijela korijena zuba

$Y_X = 1$ – faktor veličine zupčanika

$S_{Fmin} = 1,1$ - minimalna sigurnost na pitting

Slijedi da je sigurnost protiv loma pogonskog zupčanika:

$$S_{F1} = \frac{860}{416,108} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,2$$

$S_{F1} = 1984 > 1,2$ – zadovoljava uvjet

Sigurnost protiv loma gonjenog zupčanika:

$$S_{F2} = \frac{860}{\sigma_{F2}} \cdot Y_{\delta} \cdot Y_R \cdot Y_X \geq S_{Fmin} \quad (4.62)$$

$\sigma_{F2} = 425,168 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika

Slijedi da je sigurnost protiv loma gonjenog zupčanika:

$$S_{F2} = \frac{860}{425,168} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,2$$

$S_{F2} = 1,941 > 1,2$ – zadovoljava uvjet

4.4 Izbor ulja za podmazivanje

4.4.1. Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3 \cdot F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \quad (4.63)$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 148858,945}{150 \cdot 201,129} \cdot \frac{3,9791+1}{3,9791}$$

$$k_s = 18,54744 \text{ MPa}$$

4.4.2. Potrebna viskoznost ulja

$$v_{40} = 208 \cdot \left(\frac{k_s}{v} \right)^{0,418} \quad (4.64)$$

$$v_{40} = 208 \cdot \left(\frac{18,54744}{1,95832} \right)^{0,418}$$

$$v_{40} = 532,350 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Drugi stupanj zahtijeva podmazivanje uljem minimalnog viskoziteta od $532,350 \text{ mm}^2/\text{s}$. Nakon izračuna podataka za preostale stupnjeve, odrediti će se vrsta ulja koja će zadovoljiti potrebe svih stupnjeva.

5. PRORAČUN TREĆEG STUPNJA REDUKTORA

Provedeno je prema (2)

5.1 Izbor materijala zupčanika

Za izradu zupčanika upotrijebiti će se materijal Č4320 sljedećih karakteristika

Tvrdoća boka zuba : 61 HRC

Toplinska obrada: cementiranje + kaljenje

Trajna dinamička čvrstoća boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1470 \text{ N/mm}^2$

Trajna dinamička čvrstoća boka zuba: $\sigma_{FE} = 860 \text{ N/mm}^2$

5.2 Projektni proračun drugog stupnja reduktora

5.2.1. Razmak osi zupčastog para

$$\alpha \geq K_2 \cdot (i_z + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{UL}}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot \left(\frac{s_{Hmin}}{\sigma_{Hlim}}\right)^2} \quad (5.1)$$

$$K_2 = 320$$

$i_z = i_3 = 3,9791$ – prijenosni omjer drugog stupnja

$T_{UL} = T_3 = 59567 \text{ Nm}$ – ulazni moment

Faktor širine zupčanika:

$$\psi_{bd} = 0,4 + \frac{i_z}{20} \quad (5.2)$$

$$\psi_{bd} = 0,4 + \frac{3,9791}{20}$$

$$\psi_{bd} = 0,6$$

$K_A = 1,1$ – faktor primene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja

$K_V = 1,1$ – faktor dodatnih dinamičkih opterećenja

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

$K_{H\beta} = 1,07$ – faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$s_{Hmin} = 1.1$ – minimalna sigurnost na pitting

$\sigma_{Hlim} = 1470$ MPa – trajna dinamička čvrstoća površine boka zuba

Slijedi da je razmak osi zupčastog para drugog stupnja:

$$a \geq 320 \cdot (3,9791 + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{59567}{0,6} \cdot \frac{3,9791 + 1}{3,9791} \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,07 \cdot \left(\frac{1,1}{1470}\right)^2}$$

$$a \geq 737,24 \text{ mm}$$

Usvojen razmak osi:

$$a = 800 \text{ mm}$$

5.2.2. Izbor modula

Normirani modul:

$$m_n \approx 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_2}{(1 \cdot i_2)^2} \tag{5.3}$$

$$m_n \approx 0,1 \cdot \frac{800 \cdot 3,9791}{(1 \cdot 3,9791)^2}$$

$$m_n \approx 12,84024 \text{ mm}$$

Usvojeni standardni modul:

$$m_n = 14 \text{ mm}$$

Kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos 25} \quad (5.4)$$

$\beta = 25^\circ$ - nagib zuba

$$m_t = \frac{14}{\cos 25}$$

$$m_n = 15,44$$

5.2.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

$$z_1 = \frac{2 \cdot a \cdot \cos \beta}{m_n \cdot (i_2 + 1)} \quad (5.5)$$

$$z_1 = \frac{2 \cdot 800 \cdot \cos 25}{14 \cdot (3,9791 + 1)}$$

$$z_1 = 20,8026$$

$z_1 = 21$ – usvojen prvi veći cijeli broj

5.2.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = i_2 \cdot z_1 \quad (5.6)$$

$$z_2 = 3,9791 \cdot 21$$

$$z_2 = 83,5611$$

$z_2 = 82$ – usvojen prvi manji broj radi lakšeg rješavanja korekcije zupčanika

5.2.5. Točan (računski) prijenosni omjer

$$u = i = \frac{z_2}{z_1} \quad (5.7)$$

$$u = i = \frac{82}{21}$$

$$u = i = 3,90476$$

Odstupanje od i_1 :

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{i_2}{i}\right) \quad (5.8)$$

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{3,9791}{3,90476}\right)$$

$\Delta_i = -0,01904$ – zadovoljava uvjet za $i < 4,5 \rightarrow \Delta_i = -0,025 \dots +0,02$

5.2.6. Diobeni promjeri

Diobeni promjer pogonskog zupčanika

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta} \quad (5.9)$$

$$d_1 = \frac{14 \cdot 21}{\cos 12}$$

$$d_1 = 324,393 \text{ mm}$$

Diobeni promjer gonjenog zupčanika

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta} \quad (5.10)$$

$$d_2 = \frac{14 \cdot 82}{\cos 25}$$

$$d_2 = 1266,677 \text{ mm}$$

5.2.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5.11)$$

$$a_d = \frac{324,393 + 1266,677}{2}$$

$$a_d = 795,535 \text{ mm}$$

$$a_d < a \rightarrow 0 < a - a_d < 5$$

$$a - a_d = 4,465 \text{ mm}$$

5.2.8. Širina zupčanika

Širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1 \quad (5.12)$$

$$b = b_2 = 0,6 \cdot 324,393$$

$$b = b_2 = 194,635 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 225 \text{ mm} \quad - \text{ usvojeno}$$

Širina pogonskog zupčanika:

$$b_1 = b + (2 \dots 10) \quad (5.13)$$

$$b_1 = 225 + 5$$

$$b_1 = 230 \text{ mm}$$

5.2.9. Stupanj prekrivanja koraka

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \cdot \sin\beta}{\pi \cdot m_n} \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{225 \cdot \sin 25}{\pi \cdot 14}$$

$$\varepsilon_\beta = 2,162$$

5.2.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) \quad (5.15)$$

$\alpha_n = 20^\circ$ - zahvatni kut na diobenom promjeru u normalnom presjeku

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan 20}{\cos 25} \right) = 21,880^\circ$$

5.2.11. Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cdot \cos\alpha_t\right) \quad (5.16)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{795,535}{800} \cdot \cos 21,88^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 22,6629$$

5.2.12. Suma faktora pomaka profila

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2 \cdot \tan\alpha_n} \cdot (z_1 + z_2) < 1,5 \quad (5.17)$$

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

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan 22,6629 - \frac{\pi \cdot 22,6629}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0,0220$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan\alpha_t - \frac{\pi \cdot \alpha_t}{180} \quad (5.18)$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan 21,880 - \frac{\pi \cdot 21,880}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = 0,0197$$

Slijedi da je suma faktora pomaka profila:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,0220 - 0,0197}{2 \cdot \tan 20} \cdot (21 + 82) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,3243459 < 1,5 - \text{zadovoljava uvijet}$$

5.2.13. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG

$$x_1 = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{[1 - (x_1 + x_2)] \cdot \ln u}{2 \cdot \ln \left(\frac{z_{n1} + z_{n2}}{100} \right)} \quad (5.19)$$

Ekvivalentni brojevi zuba:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} \quad (5.20)$$

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

Kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n) \quad (5.21)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 25 \cdot \cos 20)$$

$$\beta_b = 0,007$$

Slijedi da su ekvivalentni brojevi zubi:

$$Z_{n1} = \frac{21}{\cos^2 0,007 \cdot \cos 25}$$

$Z_{n1} = 21,96$ - ekvivalentni broj zubi pogonskog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{82}{\cos^2 0,007 \cdot \cos 25}$$

$Z_{n2} = 89,93$ - ekvivalentni broj zubi gonjenog zupčanika

Slijedi da je raspodjela sume faktora pomaka profila:

$$x_1 = \frac{0,3243459}{2} + \frac{[1 - (0,3243459)] \cdot \ln 3,90476}{2 \cdot \ln \cdot \left(\frac{21,96 + 89,93}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,3164$$

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

$$x_2 = 0,00791$$

5.2.14. Promjeri preko korijena zuba

Promjeri preko korijena zuba:

$$d_{f1} = m_n \cdot \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2 \cdot x_1 - 2,5 \right) \quad (5.22)$$

$$d_{f1} = 14 \cdot \left(\frac{21}{\cos 25} + 2 \cdot 0,3164 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 298,253 \text{ mm}$$

Promjeri preko korijena zuba gonjenog zupčanika:

$$d_{f2} = m_n \cdot \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2 \cdot x_2 - 2,5 \right) \quad (5.23)$$

$$d_{f2} = 14 \cdot \left(\frac{82}{\cos \beta} + 2 \cdot 0,0079075 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 1231,899 \text{ mm}$$

5.2.15. Promjeri preko glave zuba

Promjeri preko glave zuba pogonskog zupčanika:

$$d_{a1} = 2 \cdot a - d_{f2} - 0,5 \cdot m_n \quad (5.24)$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 800 - 1231,899 - 0,5 \cdot 14$$

$$d_{a1} = 361,101 \text{ mm}$$

$$d_{a1} = 366 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

Promjeri preko glave zuba gonjenog zupčanika:

$$d_{a2} = 2 \cdot a - d_{f1} - 0,5 \cdot m_n \quad (5.25)$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 800 - 298,253 - 0,5 \cdot 14$$

$$d_{a2} = 1294,747 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 1298 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

5.2.16. Promjeri temeljnih krugova

Promjer temeljnog kruga pogonskog zupčanika:

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_t \quad (5.26)$$

$$d_{b1} = 324 \cdot \cos 21,88$$

$$d_{b1} = 304,830 \text{ mm}$$

Promjer temeljnog kruga gonjenog zupčanika:

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_t \quad (5.27)$$

$$d_{b2} = 1266,67 \cdot \cos 21,88$$

$$d_{b2} = 1190,288 \text{ mm}$$

5.2.17. Promjeri pogonskih krugova

Promjer pogonskog kruga pogonskog zupčanika

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot a}{i+1} \quad (5.28)$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 800}{3,9791 + 1}$$

$$d_{w1} = 326,214 \text{ mm}$$

Promjer pogonskog kruga gonjenog zupčanika:

$$d_{w2} = 2 \cdot a - d_{w1} \quad (5.29)$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 800 - 326,214$$

$$d_{w2} = 1273,786 \text{ mm}$$

5.2.18. Stupanj prekrivanja profila

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2 \cdot a \cdot \sin a_{wt}}{2 \cdot \pi \cdot m_t \cdot \cos a_t} \quad (5.30)$$

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{366^2 - 304,830^2} + \sqrt{1298^2 - 1190,288^2} - 2 \cdot 800 \cdot \sin 22,662}{2 \cdot \pi \cdot 15,44 \cdot \cos 21,88}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1,138$$

$$\varepsilon_{\alpha} > 1,1 \rightarrow 1,138 > 1,1 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Ukupno prekrivanje:

$$\varepsilon_{\gamma} = \varepsilon_{\alpha} + \varepsilon_{\beta} \quad (5.31)$$

$$\varepsilon_{\gamma} = 1,138 + 2,161$$

$$\varepsilon_{\gamma} = 3,299$$

5.2.19. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Debljina vrha zuba u normalnom presjeku pogonskog zupčanika:

$$S_{an1} = d_{a1} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot x_1 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_1} + \text{inv} a_t - \text{inv} a_{at1} \right) \cdot \cos \beta_{a1} \quad (5.32)$$

Kut zahvata na vrhu zuba:

$$a_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}} \quad (5.33)$$

$$a_{at1} = \arccos \frac{304,830}{366}$$

$$a_{at1} = 32,417$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \cdot \tan \beta \right) \quad (5.34)$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{366}{324,393} \cdot \tan 25 \right)$$

$$\beta_{at1} = 27,4326$$

$$inv\alpha_{at1} = \tan a_{at1} - \frac{\pi \cdot a_{at1}}{180} \quad (5.35)$$

$$inv\alpha_{at1} = \tan 32,417 - \frac{\pi \cdot 32,417}{180}$$

$$inv\alpha_{at1} = 0,06925$$

Slijedi da je debljina vrha zuba pogonskog zupčanika u normalnom presjeku:

$$S_{an1} = d_{a1} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,3164 \cdot \tan 20}{2 \cdot 21} + 0,0197 - 0,06925 \right) \cdot \cos 27,432$$

$$S_{an1} = 11,612 \text{ mm}$$

Relativna debljina vrha zuba pogonskog zuočanika:

$$S_{an1}^* = \frac{S_{an1}}{m_n} \quad (5.36)$$

$$S_{an1}^* = \frac{11,612}{14}$$

$$S_{an1}^* = 0,829$$

$$S_{an1}^* > 0,4 \rightarrow 0,829 > 0,4 - \text{zadovoljavan uvijet}$$

Debljina vrha zuba u normalnom presjeku gonjenog zupčanika:

$$S_{an2} = d_{a2} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot x_2 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_2} + inv\alpha_t - inv\alpha_{at2} \right) \cdot \cos \beta_{a2} \quad (5.37)$$

Kut zahvata na vrhu zuba:

$$a_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}} \quad (5.38)$$

$$a_{at2} = \arccos \frac{1190,288}{1298}$$

$$a_{at2} = 23,173$$

$$\beta_{a2} = \arctan\left(\frac{d_{a2}}{d_2} \cdot \tan \beta\right) \quad (5.39)$$

$$\beta_{a2} = \arctan\left(\frac{1298}{1266,68} \cdot \tan 25\right)$$

$$\beta_{a2} = 25,484$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \cdot \alpha_{at2}}{180} \quad (5.40)$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = \tan 23,173 - \frac{\pi \cdot 23,173}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = 0,02359$$

Slijedi da je debljina vrha zuba pogonskog zupčanika u normalnom presjeku:

$$S_{an2} = d_{a2} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,0079 \cdot \tan 20}{2 \cdot 82} + 0,01971 - 0,02359 \right) \cdot \cos 25,484$$

$$S_{an2} = 17,932 \text{ mm}$$

Relativna debljina vrha zuba pogonskog zuočanika:

$$S_{an2}^* = \frac{S_{an2}}{m_n} \quad (5.41)$$

$$S_{an2}^* = \frac{17,932}{14}$$

$$S_{an2}^* = 1,281$$

$$S_{an2}^* > 0,4 \rightarrow 1,281 > 0,4 - \text{zadovoljavan uvijet}$$

5.3 Kontrolni proračun drugog stupnja reduktora

5.3.1. Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika

$$\sigma_H = Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\beta \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (5.42)$$

Faktor modula elastičnosti za čelik:

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

Faktor zone:

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} \quad (5.43)$$

$$Z_H = \frac{1}{\cos 21,88} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos 0,007}{\tan 22,663}}$$

$$Z_H = 2,3585$$

Faktor nagiba zuba:

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} \quad (5.44)$$

$$Z_\beta = \sqrt{\cos 25}$$

$$Z_\beta = 0,952$$

Faktor utjecanja prekrivanja:

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}} \quad (5.45)$$

$$Z_\varepsilon = 0,937$$

Tangencijalna sila:

$$F_t = \frac{2000 \cdot T_1}{d_1} \quad (5.46)$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 59567,018}{324,393}$$

$$F_t = 367251,992 \text{ N}$$

Faktor primjene:

$$K_A = 1,1$$

Obodna brzina zupčanika:

$$v_1 = \frac{d_1 \cdot n_1}{19100} \quad (5.47)$$

$$v_1 = \frac{324,393 \cdot 46,74}{19100}$$

$$v_1 = 0,794 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja nastalih netočnošću izrade:

$$K_{V\beta} = 1 + Q^2 \cdot v_1 \cdot z_1 \cdot 10^{-5} \quad (5.48)$$

$$K_{V\beta} = 1 + 6^2 \cdot 0,794 \cdot 21 \cdot 10^{-5}$$

$$K_{V\beta} = 1,006$$

$$K_{Va} = 1 + 1,8 \cdot Q^2 \cdot v_1 \cdot z_1 \cdot 10^{-5} \quad (5.49)$$

$$K_{Va} = 1 + 1,8 \cdot 6^2 \cdot 0,794 \cdot 21 \cdot 10^{-5}$$

$$K_{Va} = 1,011$$

$$K_V = K_{Va} - \varepsilon_\beta \cdot (K_{Va} - K_{V\beta}) \quad (5.50)$$

$$K_V = 1,011 - 2,1619 \cdot (1,011 - 1,006)$$

$$K_V = 1,006$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu:

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

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba:

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left(\frac{b}{d_1}\right) + 0,0005b \quad (5.51)$$

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left(\frac{225}{324,39}\right) + 0,0005 \cdot 225$$

$$K_{H\beta} = 1,3691$$

Slijedi da je kontaktni pritisak na bokovima spregnutih zupčanika:

$$\sigma_H = 190\sqrt{MPa} \cdot 2,358\sqrt{MPa} \cdot 0,952 \cdot 0,9374 \cdot \sqrt{\frac{367251}{225 \cdot 324,39} \cdot \frac{3,9791+1}{3,9791} \cdot 1,1 \cdot 1,006 \cdot 1,1 \cdot 1,369}$$

$$\sigma_H = 1297,91 \text{ MPa}$$

5.3.2. Sigurnost na pitting

$$S_H = \frac{\sigma_{hlim}}{\sigma_H} \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R \cdot Z_X \cdot Z_W > S_{Hmin} \quad (5.52)$$

Minimalna sigurnost na pitting:

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

Trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320:

$$\sigma_{hlim} = 1470 \text{ N/mm}^2$$

Hidroelastični – tribomehanički faktor:

$$Z_L Z_V Z_R = Z_{LVR}$$

Z_L – utjecaj maziva

Z_V – utjecaj brzine

Z_R – utjecaj hrapavosti boka

$Z_{LVR} = 1$ – za brušene zupčanike

Faktor povećanja tvrdoće:

$$Z_W = 1$$

Faktor utjecanja veličine:

$$Z_X = 1$$

Slijedi da je sigurnost na pitting:

$$S_H = \frac{1470}{1297,91} \cdot 1$$

$S_H = 1,1326 > 1,1$ – zadovoljava uvjet

Nosivost korijena zuba:

Naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = \frac{F_t}{b_1 \cdot m_n} \cdot Y_{FS1} \cdot Y_\beta \cdot Y_\varepsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (5.53)$$

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$Y_{FS1} \approx 4,8 + 0,18 \cdot x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \cdot \frac{x_1}{Z_{n1}} \quad (5.54)$$

Fiktivni broj zuba pogonskog zupčanika:

$$Z_{n1} \approx \frac{z_1}{\cos^3 \beta} \quad (5.55)$$

$$Z_{n1} \approx \frac{21}{\cos^3 25}$$

$$Z_{n1} \approx 29,4988$$

Slijedi da je faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$Y_{FS1} \approx 4,8 + 0,18 \cdot 0,3164^2 + \frac{7,63}{29,4988} - 15,94 \cdot \frac{0,3164}{29,4988}$$

$$Y_{FS1} \approx 4,186$$

Faktor kuta nagiba:

$$Y_\beta = 1 - \frac{\varepsilon_\beta \cdot \beta}{120} \quad (5.56)$$

$$Y_\beta = 1 - \frac{2,162 \cdot 25}{120}$$

$$Y_\beta = 0,5496$$

Faktor stupnja prekrivanja profila:

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_\alpha} \quad (5.57)$$

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2 25}{1,138}$$

$$Y_\varepsilon = 0,5$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu:

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

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba:

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} \quad (5.58)$$

$$K_{F\beta} = 1,3691^{0,9}$$

$$K_{F\beta} = 1,3267$$

Slijedi da je naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = \frac{367251,922}{230 \cdot 14} \cdot 4,1856 \cdot 0,5495 \cdot 0,5 \cdot 1,1 \cdot 1,006 \cdot 1,1 \cdot 1,326$$

$$\sigma_{F1} = 231,953 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = \frac{F_t}{b_2 \cdot m_n} \cdot Y_{FS2} \cdot Y_\beta \cdot Y_\epsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (5.59)$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$Y_{FS2} \approx 4,8 + 0,18 \cdot x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \cdot \frac{x_2}{Z_{n2}} \quad (5.60)$$

Fiktivni broj zuba gonjenog zupčanika:

$$Z_{n2} \approx \frac{z_2}{\cos^3 \beta} \quad (5.61)$$

$$Z_{n2} \approx \frac{82}{\cos^3 25}$$

$$Z_{n2} \approx 349,69$$

Slijedi da je faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$Y_{FS2} \approx 4,8 + 0,18 \cdot 0,0079^2 + \frac{7,63}{349,69} - 15,94 \cdot \frac{0,0079}{349,69}$$

$$Y_{FS2} \approx 4,1014$$

Slijedi da je naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = \frac{367251,992}{230 \cdot 14} \cdot 4,1014 \cdot 0,5495 \cdot 0,5 \cdot 1,1 \cdot 1,006 \cdot 1,1 \cdot 1,326$$

$$\sigma_{F2} = 232,337 \text{ N/mm}^2$$

5.3.3. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma pogonskog zupčanika:

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_{F1}} \cdot Y_{\delta} \cdot Y_R \cdot Y_X \geq S_{Fmin} \quad (5.62)$$

$\sigma_{FE} = 860 \text{ N/mm}^2$ – dinamička čvrtoća korijena zuba za materijal Č4320

$\sigma_{F1} = 231,953 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika

$Y_{\delta} \approx 1$ – faktor osjetljivosti materijala na koncentraciju naprezanja

$Y_R = 1$ – utjecaj hrapavosti prijelanog dijela korijena zuba

$Y_X = 1$ – faktor veličine zupčanika

$S_{Fmin} = 1,1$ - minimalna sigurnost na pitting

Slijedi da je sigurnost protiv loma pogonskog zupčanika:

$$S_{F1} = \frac{860}{231,953} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 2$$

$S_{F1} = 3,707 > 1,2$ – ne zadovoljava ali zbog razmaka osi morali smo promijeniti određene parametre da bi nam reduktor bio funkcionalan

Sigurnost protiv loma gonjenog zupčanika:

$$S_{F2} = \frac{860}{\sigma_{F2}} \cdot Y_{\delta} \cdot Y_R \cdot Y_X \geq S_{Fmin}$$

$\sigma_{F2} = 232,337 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika

Slijedi da je sigurnost protiv loma gonjenog zupčanika:

$$S_{F2} = \frac{860}{232,33} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 2$$

$S_{F2} = 3,701 > 2$ – ne zadovoljava ali zbog razmaka osi morali smo promijeniti određene parametre da bi nam reduktor bio funkcionalan

5.4 Izbor ulja za podmazivanje

5.4.1. Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3 \cdot F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \quad (5.63)$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 367251,992}{225 \cdot 324,393} \cdot \frac{3,9791+1}{3,9791}$$

$$k_s = 18,961 \text{ MPa}$$

5.4.2. Potrebna viskoznost ulja

$$v_{40} = 208 \cdot \left(\frac{k_s}{v} \right)^{0,418} \quad (5.64)$$

$$v_{40} = 208 \cdot \left(\frac{18,963}{0,79377} \right)^{0,418}$$

$$v_{40} = 783,6705 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Treći stupanj zahtijeva podmazivanje uljem minimalnog viskoziteta od $783 \text{ mm}^2/\text{s}$. Nakon proračunatih vrijednosti svih stupnjeva, određeno je da će ulje za reduktor imati viskoznost od $783 \text{ mm}^2/\text{s}$.

6. PRORAČUN POMOĆNOG STUPNJA

6.1 Određivanje ulaznih parametara za pomoćno vratilo

Ulazni podatci:

$$P_1 = 10 \text{ kW}$$

$$n_1 = 3000 \text{ min}^{-1}$$

$$n_2 = 740 \text{ min}^{-1}$$

$K_A \cdot 1,15$ – zbog toga što radi kao multipkilator

Izbor materijala zupčanika

Za izradu zupčanika upotrijebiti će se materijal Č4320 sljedećih karakteristika

Tvrdoća boka zuba : 61 HRC

Toplinska obrada: cementiranje + kaljenje

Trajna dinamička čvrstoća boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1470 \text{ N/mm}^2$

Trajna dinamička čvrstoća boka zuba: $\sigma_{FE} = 860 \text{ N/mm}^2$

6.2 Projektni proračun drugog stupnja reduktora

6.2.1. Razmak osi zupčastog para

$$\alpha \geq K_2 \cdot (i_z + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{UL}}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot \left(\frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hlim}}\right)^2} \quad (6.1)$$

$$K_2 = 320$$

$i_z = i_3 = 3,9791$ – prijenosni omjer drugog stupnja

$T_{UL} = T_3 = 31,83 \text{ Nm}$ – ulazni moment

Faktor širine zupčanika:

$$\psi_{bd} = 0,4 + \frac{i_z}{20} \quad (6.2)$$

$$\psi_{bd} = 0,4 + \frac{3,9791}{20}$$

$$\psi_{bd} = 0,6$$

$K_A = 1,1$ – faktor primene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja

$K_V = 1,1$ – faktor dodatnih dinamičkih opterećenja

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

$K_{H\beta} = 1,07$ – faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$s_{Hmin} = 1.1$ – minimalna sigurnost na pitting

$\sigma_{Hlim} = 1470$ MPa – trajna dinamička čvrstoća površine boka zuba

Slijedi da je razmak osi zupčastog para drugog stupnja:

$$a \geq 320 \cdot (3,9791 + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{31,83}{0,6} \cdot \frac{3,9791 + 1}{3,9791} \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,07 \cdot \left(\frac{1,1}{1470}\right)^2}$$

$$a \geq 62,678 \text{ mm}$$

Usvojen razmak osi:

$$a = 295 \text{ mm}$$

6.2.2. Izbor modula

Normirani modul:

$$m_n \approx 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_2}{(1 \cdot i_2)^2} \quad (6.3)$$

$$m_n \approx 0,1 \cdot \frac{295 \cdot 3,9791}{(1 \cdot 3,9791)^2}$$

$$m_n \approx 4,734 \text{ mm}$$

Usvojeni standardni modul:

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

Kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos 20} \quad (6.4)$$

$\beta = 25^\circ$ - nagib zuba

$$m_t = \frac{6}{\cos 20}$$

$$m_t = 6,134$$

6.2.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

$$z_1 = \frac{2 \cdot a \cdot \cos \beta}{m_n \cdot (i_2 + 1)} \quad (6.5)$$

$$z_1 = \frac{2 \cdot 295 \cdot \cos 12}{6 \cdot (3,9791 + 1)}$$

$$z_1 = 19,3177$$

$z_1 = 19$ – usvojen prvi manji cijeli broj

6.2.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = i_2 \cdot z_1 \quad (6.6)$$

$$z_2 = 3,9791 \cdot 19$$

$$z_2 = 75,6029$$

$$z_2 = 77$$

6.2.5. Točan (računski) prijenosni omjer

$$u = i = \frac{z_2}{z_1} \quad (6.7)$$

$$u = i = \frac{77}{19}$$

$u = i = 4,05263$ Odstupanje od i_1 :

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{i_2}{i}\right) \quad (6.8)$$

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{3,9791}{4,05263}\right)$$

$\Delta_i = 0,01814$ – zadovoljava uvijet za $i < 4,5$

6.2.6. Diobeni promjeri

Diobeni promjer pogonskog zupčanika

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta} \quad (6.9)$$

$$d_1 = \frac{6 \cdot 19}{\cos 12}$$

$$d_1 = 116,547 \text{ mm}$$

Diobeni promjer gonjenog zupčanika

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta} \quad (6.10)$$

$$d_2 = \frac{6 \cdot 77}{\cos 12}$$

$$d_2 = 100,41 \text{ mm}$$

6.2.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (6.11)$$

$$a_d = \frac{116,547 + 472,321}{2}$$

$$a_d = 294,434 \text{ mm}$$

$$a_d < a \rightarrow 0 < a - a_d < 5$$

$$a - a_d = 0,566 \text{ mm}$$

6.2.8. Širina zupčanika

Širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1 \quad (6.12)$$

$$b = b_2 = 0,6 \cdot 116,546$$

$$b = b_2 = 69,928 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 70 \text{ mm} \quad - \text{ usvojeno}$$

Širina pogonskog zupčanika:

$$b_1 = b + (2 \dots 10) \quad (6.13)$$

$$b_1 = 70 + 5$$

$$b_1 = 75 \text{ mm}$$

6.2.9. Stupanj prekrivanja koraka

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \cdot \sin \beta}{\pi \cdot m_n} \quad (6.14)$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{70 \cdot \sin 12}{\pi \cdot 6}$$

$$\varepsilon_\beta = 0,7721$$

6.2.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) \quad (6.15)$$

$\alpha_n = 20^\circ$ - zahvatni kut na diobenom promjeru u normalnom presjeku

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan 20}{\cos 12} \right) = 20,4103$$

6.2.11. Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

$$\alpha_{wt} = \arccos \left(\frac{a_d}{a} \cdot \cos \alpha_t \right) \quad (6.16)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos \left(\frac{294,434}{295} \cdot \cos 20,4103^\circ \right)$$

$$\alpha_{wt} = 20,70366$$

6.2.12. Suma faktora pomaka profila

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv} \alpha_{wt} - \text{inv} \alpha_t}{2 \cdot \tan \alpha_n} \cdot (z_1 + z_2) < 1,5 \quad (6.17)$$

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

$$\text{inv} \alpha_{wt} = \tan 20,704 - \frac{\pi \cdot 20,704}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{wt} = 0,01659$$

$$\text{inv} \alpha_t = \tan \alpha_t - \frac{\pi \cdot \alpha_t}{180} \quad (6.18)$$

$$\text{inv} \alpha_t = \tan 20,4103 - \frac{\pi \cdot 20,4103}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_t = 0,01587$$

Slijedi da je suma faktora pomaka profila:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,01659 - 0,01587}{2 \cdot \tan 20} \cdot (19 + 77) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,095 < 1,5 - \text{zadovoljava uvijet}$$

6.2.13. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG

$$x_1 = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{[1 - (x_1 + x_2)] \cdot \ln u}{2 \cdot \ln \left(\frac{Z_{n1} + Z_{n2}}{100} \right)} \quad (6.19)$$

Ekvivalentni brojevi zuba:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} \quad (6.20)$$

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

Kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n) \quad (6.21)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 12 \cdot \cos 20)$$

$$\beta_b = 0,003$$

Slijedi da su ekvivalentni brojevi zubi:

$$Z_{n1} = \frac{19}{\cos^2 0,003 \cdot \cos 12}$$

$$Z_{n1} = 23,355 - \text{ekvivalentni broj zubi pogonskog zupčanika}$$

$$Z_{n2} = \frac{77}{\cos^2 0,003 \cdot \cos 12}$$

$$Z_{n2} = 93,419 - \text{ekvivalentni broj zubi gonjenog zupčanika}$$

Slijedi da je raspodjela sume faktora pomaka profila:

$$x_1 = \frac{0,108}{2} + \frac{[1 - (0,253 - 0,0157)] \cdot \ln 3,9565}{2 \cdot \ln \cdot \left(\frac{23,355 + 93,419}{100}\right)}$$

$$x_1 = 0,253$$

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

$$x_2 = -0,158$$

6.2.14. Promjeri preko korijena zuba

Promjeri preko korijena zuba:

$$d_{f1} = m_n \cdot \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2 \cdot x_1 - 2,5\right) \quad (6.22)$$

$$d_{f1} = 6 \cdot \left(\frac{19}{\cos 12} + 2 \cdot 0,253 - 2,5\right)$$

$$d_{f1} = 104,582 \text{ mm}$$

Promjeri preko korijena zuba gonjenog zupčanika:

$$d_{f2} = m_n \cdot \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2 \cdot x_2 - 2,5\right) \quad (6.23)$$

$$d_{f2} = 6 \cdot \left(\frac{77}{\cos 12} + 2 \cdot (-0,158 - 2,5)\right)$$

$$d_{f2} = 455,426 \text{ mm}$$

6.2.15. Promjeri preko glave zuba

Promjeri preko glave zuba pogonskog zupčanika:

$$d_{a1} = 2 \cdot a - d_{f2} - 0,5 \cdot m_n \quad (6.24)$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 295 - 455,426 - 0,5 \cdot 6$$

$$d_{a1} = 131,574 \text{ mm}$$

$$d_{a1} = 132 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

Promjeri preko glave zuba gonjenog zupčanika:

$$d_{a2} = 2 \cdot a - d_{f1} - 0,5 \cdot m_n \quad (6.25)$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 295 - 104,582 - 0,5 \cdot 6$$

$$d_{a2} = 482,418 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 482 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

6.2.16. Promjeri temeljnih krugova

Promjer temeljnog kruga pogonskog zupčanika:

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_t \quad (6.26)$$

$$d_{b1} = 116,547 \cdot \cos 20,4103$$

$$d_{b1} = 109,518 \text{ mm}$$

Promjer temeljnog kruga gonjenog zupčanika:

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_t \quad (6.27)$$

$$d_{b2} = 472,321 \cdot \cos 20,4103$$

$$d_{b2} = 443,837 \text{ mm}$$

6.2.17. Promjeri pogonskih krugova

Promjer pogonskog kruga pogonskog zupčanika

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot a}{i+1} \quad (6.28)$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 295}{3,9791 + 1}$$

$$d_{w1} = 116,771 \text{ mm}$$

Promjer pogonskog kruga gonjenog zupčanika:

$$d_{w2} = 2 \cdot a - d_{w1} \quad (6.29)$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 295 - 116,771$$

$$d_{w2} = 473,229 \text{ mm}$$

6.2.18. Stupanj prekrivanja profila

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2 \cdot a \cdot \sin a_{wt}}{2 \cdot \pi \cdot m_t \cdot \cos a_t} \quad (6.30)$$

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{132^2 - 109,518^2} + \sqrt{482^2 - 443,837^2} - 2 \cdot 295 \cdot \sin 20,704}{2 \cdot \pi \cdot 6,134 \cdot \cos 20,4103}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1,469$$

$$\varepsilon_{\alpha} > 1,1 \rightarrow 1,469 > 1,1 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Ukupno prekrivanje:

$$\varepsilon_{\gamma} = \varepsilon_{\alpha} + \varepsilon_{\beta} \quad (6.31)$$

$$\varepsilon_{\gamma} = 1,469 + 0,772$$

$$\varepsilon_{\gamma} = 2,241$$

6.2.19. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Debljina vrha zuba u normalnom presjeku pogonskog zupčanika:

$$S_{an1} = d_{a1} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot x_1 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_1} + \text{inv} a_t - \text{inv} a_{at1} \right) \cdot \cos \beta_{a1} \quad (6.32)$$

Kut zahvata na vrhu zuba:

$$a_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}} \quad (6.33)$$

$$a_{at1} = \arccos \frac{109,518}{132}$$

$$a_{at1} = 33,657$$

$$\beta_{a1} = \arctan\left(\frac{d_{a1}}{d_1} \cdot \tan \beta\right) \quad (6.34)$$

$$\beta_{a1} = \arctan\left(\frac{132}{116,547} \cdot \tan 12\right)$$

$$\beta_{at1} = 13,494$$

$$\text{inv}\alpha_{at1} = \tan a_{at1} - \frac{\pi \cdot a_{at1}}{180} \quad (6.35)$$

$$\text{inv}\alpha_{at1} = \tan 33,657 - \frac{\pi \cdot 33,657}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{at1} = 0,0784$$

Slijedi da je debljina vrha zuba pogonskog zupčanika u normalnom presjeku:

$$S_{an1} = 132 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0,253 \cdot \tan 20}{2 \cdot 23} + 0,0158 - 0,0784\right) \cdot \cos 13,494$$

$$S_{an1} = 3,844 \text{ mm}$$

Relativna debljina vrha zuba pogonskog zuočanika:

$$S_{an1}^* = \frac{S_{an1}}{m_n} \quad (6.36)$$

$$S_{an1}^* = \frac{3,844}{6}$$

$$S_{an1}^* = 0,64$$

$$S_{an1}^* > 0,4 \rightarrow 0,64 > 0,4 - \text{zadovoljavan uvijet}$$

Debljina vrha zuba u normalnom presjeku gonjenog zupčanika:

$$S_{an2} = d_{a2} \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot x_2 \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z_2} + \text{inv}\alpha_t - \text{inv}\alpha_{at2}\right) \cdot \cos \beta_{a2} \quad (6.37)$$

Kut zahvata na vrhu zuba:

$$a_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}} \quad (6.38)$$

$$a_{at2} = \arccos \frac{443,837}{482}$$

$$a_{at2} = 23,07$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \cdot \tan \beta \right) \quad (6.39)$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{482}{472,321} \cdot \tan 12 \right)$$

$$\beta_{a2} = 12,248$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan a_{at2} - \frac{\pi \cdot a_{at2}}{180} \quad (6.40)$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan 23,07 - \frac{\pi \cdot 23,07}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = 0,0232$$

Slijedi da je debljina vrha zuba pogonskog zupčanika u normalnom presjeku:

$$S_{an2} = 482 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot (-0,158) \cdot \tan 20}{2 \cdot 82} + 0,01587 - 0,0232 \right) \cdot \cos 12,248$$

$$S_{an2} = 5,4264 \text{ mm}$$

Relativna debljina vrha zuba pogonskog zuočanika:

$$S_{an2}^* = \frac{S_{an2}}{m_n} \quad (6.41)$$

$$S_{an2}^* = \frac{5,4264}{6}$$

$$S_{an2}^* = 0,9044$$

$S_{an2}^* > 0,4 \rightarrow 0,9044 > 0,4$ – zadovoljavan uvijet

6.3 Kontrolni proračun drugog stupnja reduktora

6.3.1. Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika

$$\sigma_H = Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\beta \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (6.42)$$

Faktor modula elastičnosti za čelik:

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

Faktor zone:

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} \quad (6.43)$$

$$Z_H = \frac{1}{\cos 20,4103} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos 0,003}{\tan 20,703}}$$

$$Z_H = 2,454$$

Faktor nagiba zuba:

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} \quad (6.44)$$

$$Z_\beta = \sqrt{\cos 12}$$

$$Z_\beta = 0,99$$

Faktor utjecanja prekrivanja:

$$Z_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\alpha}}} \quad (6.45)$$

$$Z_{\varepsilon} = 0,824$$

Tangencijalna sila:

$$F_t = \frac{2000 \cdot T_1}{d_1} \quad (6.46)$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 31,83}{116,546}$$

$$F_t = 546,218 \text{ N}$$

Faktor primjene:

$$K_A = 1,265$$

Obodna brzina zupčanika:

$$v_1 = \frac{d_1 \cdot n_1}{19100} \quad (6.47)$$

$$v_1 = \frac{116,546 \cdot 3000}{19100}$$

$$v_1 = 18,3057 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja nastalih netočnošću izrade:

$$K_{V\beta} = 1 + Q^2 \cdot v_1 \cdot z_1 \cdot 10^{-5} \quad (6.48)$$

$$K_{V\beta} = 1 + 6^2 \cdot 18,3057 \cdot 19 \cdot 10^{-5}$$

$$K_{V\beta} = 1,125$$

$$K_{Va} = 1 + 1,8 \cdot Q^2 \cdot v_1 \cdot z_1 \cdot 10^{-5} \quad (6.49)$$

$$K_{Va} = 1 + 1,8 \cdot 6^2 \cdot 18,3057 \cdot 19 \cdot 10^{-5}$$

$$K_{Va} = 1,125$$

$$K_V = K_{Va} - \varepsilon_\beta \cdot (K_{Va} - K_{V\beta}) \quad (6.50)$$

$$K_V = 1,125 - 0,77 \cdot (1,125 - 1,125)$$

$$K_V = 1,125$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu:

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

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba:

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left(\frac{b}{d_1}\right) + 0,0005b \quad (6.51)$$

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left(\frac{70}{116,546}\right) + 0,0005 \cdot 70$$

$$K_{H\beta} = 1,26699$$

Slijedi da je kontaktni pritisak na bokovima spregnutih zupčanika:

$$\sigma_H = 190\sqrt{MPa} \cdot 2,454 \cdot 0,989 \cdot 0,825 \cdot \sqrt{\frac{546,218}{70 \cdot 116,546} \cdot \frac{3,9791+1}{3,9791} \cdot 1,265 \cdot 1,125 \cdot 1,1 \cdot 1,2699}$$

$$\sigma_H = 155,021 \text{ MPa}$$

6.3.2. Sigurnost na pitting

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R \cdot Z_X \cdot Z_W > S_{Hmin} \quad (6.52)$$

Minimalna sigurnost na pitting:

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

Trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320:

$$\sigma_{hlim} = 1470 \text{ N/mm}^2$$

Hidroelastični – tribomehanički faktor:

$$Z_L Z_V Z_R = Z_{LVR}$$

Z_L – utjecaj maziva

Z_V – utjecaj brzine

Z_R – utjecaj hrapavosti boka

$Z_{LVR} = 1$ – za brušene zupčanike

Faktor povećanja tvrdoće:

$$Z_W = 1$$

Faktor utjecanja veličine:

$$Z_X = 1$$

Slijedi da je sigurnost na pitting:

$$S_H = \frac{1470}{155} \cdot 1$$

$S_H = 9,96 > 1,1$ - ne zadovoljava uvijet ali zbog tog što smo morali povećat razmak osi skočio nam je pitting.

Nosivost korijena zuba:

Naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = \frac{F_t}{b_1 \cdot m_n} \cdot Y_{FS1} \cdot Y_\beta \cdot Y_\epsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (6.53)$$

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$Y_{FS1} \approx 4,8 + 0,18 \cdot x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \cdot \frac{x_1}{Z_{n1}} \quad (6.54)$$

Fiktivni broj zuba pogonskog zupčanika:

$$Z_{n1} \approx \frac{z_1}{\cos^3 \beta} \quad (6.55)$$

$$Z_{n1} \approx \frac{19}{\cos^3 12}$$

$$Z_{n1} \approx 20,641$$

Slijedi da je faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$Y_{FS1} \approx 4,8 + 0,18 \cdot 0,253^2 + \frac{7,63}{20,641} - 15,94 \cdot \frac{0,253}{20,641}$$

$$Y_{FS1} \approx 4,265$$

Faktor kuta nagiba:

$$Y_\beta = 1 - \frac{\varepsilon_\beta \cdot \beta}{120} \quad (6.56)$$

$$Y_\beta = 1 - \frac{0,7721 \cdot 12}{120}$$

$$Y_\beta = 0,922$$

Faktor stupnja prekrivanja profila:

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_\alpha} \quad (6.57)$$

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2 12}{1,469}$$

$$Y_\varepsilon = 0,738$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu:

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

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba:

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} \quad (6.58)$$

$$K_{F\beta} = 1,2699^{0,9}$$

$$K_{F\beta} = 1,2399$$

Slijedi da je naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = \frac{546,218}{75 \cdot 1} \cdot 4,265 \cdot 0,922 \cdot 0,738 \cdot 1,265 \cdot 1,1 \cdot 1,125 \cdot 1,239$$

$$\sigma_{F1} = 6,6962 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = \frac{F_t}{b_2 \cdot m_n} \cdot Y_{FS2} \cdot Y_\beta \cdot Y_\epsilon \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (6.59)$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$Y_{FS2} \approx 4,8 + 0,18 \cdot x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \cdot \frac{x_2}{Z_{n2}} \quad (6.60)$$

Fiktivni broj zuba gonjenog zupčanika:

$$Z_{n2} \approx \frac{z_2}{\cos^3 \beta} \quad (6.61)$$

$$Z_{n2} \approx \frac{77}{\cos^3 12}$$

$$Z_{n2} \approx 82,27$$

Slijedi da je faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$Y_{FS2} \approx 4,8 + 0,18 \cdot (-0,157)^2 + \frac{7,63}{82,27} - 15,94 \cdot \frac{-0,157}{82,27}$$

$$Y_{FS2} \approx 4,208$$

Slijedi da je naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = \frac{546,218}{70 \cdot 6} \cdot 4,207 \cdot 0,922 \cdot 0,738 \cdot 1,265 \cdot 1,125 \cdot 1,1 \cdot 1,2399$$

$$\sigma_{F2} = 7,076 \text{ N/mm}^2$$

6.3.3. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma pogonskog zupčanika:

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_{F1}} \cdot Y_{\delta} \cdot Y_R \cdot Y_X \geq S_{Fmin} \quad (6.2)$$

$\sigma_{FE} = 860 \text{ N/mm}^2$ – dinamička čvrtoća korijena zuba za materijal Č4320

$\sigma_{F1} = 6,69 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje na savijanje pogonskog zupčanika

$Y_{\delta} \approx 1$ – faktor osjetljivosti materijala na koncentraciju naprezanja

$Y_R = 1$ – utjecaj hrapavosti prijelanog dijela korijena zuba

$Y_X = 1$ – faktor veličine zupčanika

$S_{Fmin} = 1,1$ - minimalna sigurnost na pitting

Slijedi da je sigurnost protiv loma pogonskog zupčanika:

$$S_{F1} = \frac{860}{6,69} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 2$$

$S_{F1} = 128,429 > 1,2$ – kako nam je pitting prešao granicu onda nam je automatski povuklo i sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma gonjenog zupčanika:

$$S_{F2} = \frac{860}{\sigma_{F2}} \cdot Y_{\delta} \cdot Y_R \cdot Y_X \geq S_{Fmin}$$

$\sigma_{F2} = 7,0769 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje na savijanje gonjenog zupčanika

Slijedi da je sigurnost protiv loma gonjenog zupčanika:

$$S_{F2} = \frac{860}{7,07} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 2$$

$S_{F2} = 121,521 > 2$ – zadovoljava uvjet

6.4 Izbor ulja za podmazivanje

6.4.1. Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3 \cdot F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \tag{6.3}$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 546,218}{70 \cdot 116,546} \cdot \frac{3,9791+1}{3,9791}$$

$$k_s = 0,25 \text{ MPa}$$

6.4.2. Potrebna viskoznost ulja

$$v_{40} = 208 \cdot \left(\frac{k_s}{v} \right)^{0,418} \tag{6.64}$$

$$v_{40} = 208 \cdot \left(\frac{0,25}{18,30} \right)^{0,418}$$

$$v_{40} = 34,589 \text{ mm}^2/\text{s}$$

6.4.3. Izbor sistema za podmazivanje

Snaga hlađenja:

$$P_H = P_{UL} - P_{IZL} \quad (6.65)$$

$$P_{UL} = 297,5 \text{ kW} - \text{snaga na ulazu}$$

$$P_{IZL} = 280 \text{ kW} - \text{snaga na izlazu}$$

$$P_H = 297,5 - 280$$

$$P_H = 17,5 \text{ kW}$$

Količina ulja potrebna za hlađenje:

$$P_H = m_{ulja} \cdot c_{ulja} \cdot \Delta t_{ulja} \quad (6.66)$$

$$c_{ulja} = 1,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - \text{toplinski kapacitet ulja}$$

$$\Delta t_{ulja} = 5 - \text{razlika temperatura ulja}$$

Maseni protok:

$$m_{ulja} = V_{ulja} \cdot \rho_{ulja} \quad (6.67)$$

$$\rho_{ulja} = 850 \text{ kg/m}^3 - \text{gustoća ulja}$$

Slijedi da je volumni protok ulja:

$$m_{ulja} = \frac{P_H}{\rho_{ulja} \cdot c_{ulja} \cdot \Delta t_{ulja}} \quad (6.68)$$

$$m_{ulja} = \frac{17,5}{850 \cdot 1,8 \cdot 5}$$

$$m_{ulja} = 0,0022875 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 137,25 \text{ l/m}$$

7. IZBOR LEŽAJA I PROMJER VRATILA

7.1 Vratilo 1 –

Na slici 7.1. se nalazi slika vratila 1 sa pogonskim zupčanikom te svim bitnim oznakama



Slika 7.1. Vratilo broj 1

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \tau_{dop}}} \quad (7.1)$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt-0}}{10 \dots 12}, \quad (7.2)$$

$R_{dt-0} = 435 \text{ N/mm}^2$ – trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320

$$\tau_{dop} = \frac{435}{12}$$

$$\tau_{dop} = 36,25 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 3839,2}{\pi \cdot 36,25}}$$

$$d_{vr1} = 81,402 \text{ mm}$$

Usvajamo $d_{vr1} = 90 \text{ mm}$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt} \quad (7.3)$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} - \text{obodna sila} \quad (7.4)$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 3839,2 \cdot 10^3}{142}$$

$$F_{wt} = 54073,24 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 54073,24 \cdot \tan(21,88)$$

$$F_r = 21715,381 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w \quad (7.5)$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta \quad (7.6)$$

$$\tan \beta_w = \frac{355}{352,71} \cdot \tan 12$$

$$\tan \beta_w = 0,2139$$

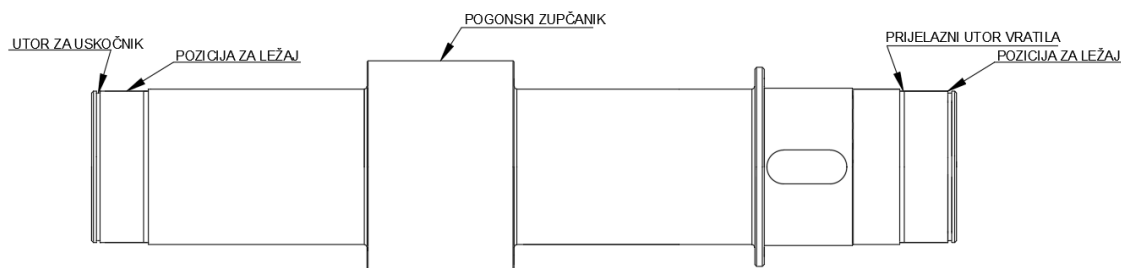
pa je:

$$F_a = 54073,24 \cdot 0,2139$$

$$F_a = 11566,266 \text{ N}$$

7.2 Vratilo 2

Na slici 7.2. se nalazi slika vratila 2 sa pogonskim zupčanicom te svim bitnim oznakama



Slika 7.2. Vratilo broj 2

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr2} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \tau_{dop}}} \quad (7.7)$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt-0}}{10 \dots 12}, \quad (7.8)$$

$R_{dt-0} = 435 \text{ N/mm}^2$ – trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320

$$\tau_{dop} = \frac{435}{12}$$

$$\tau_{dop} = 36,25 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr2} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 14969,97}{\pi \cdot 36,25}}$$

$$d_{vr2} = 128,123 \text{ mm}$$

Usvajamo $d_{vr2} = 140 \text{ mm}$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt} \quad (7.9)$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} - \text{obodna sila} \quad (7.10)$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 14969,97 \cdot 10^3}{142}$$

$$F_{wt} = 210844,65 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 210844,65 \cdot \tan(21,788)$$

$$F_r = 84280,62 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w \quad (7.11)$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta \quad (7.12)$$

$$\tan \beta_w = \frac{355}{352,71} \cdot \tan 12$$

$$\tan \beta_w = 0,2139$$

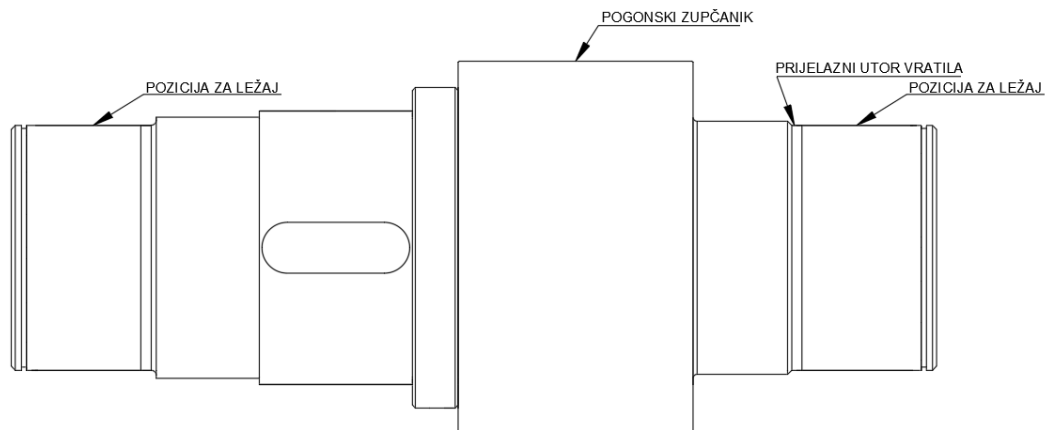
pa je:

$$F_a = 210844,65 \cdot 0,2139$$

$$F_a = 45099,67 \text{ N}$$

7.3 Vratilo 3

Na slici 7.3. se nalazi slika vratila 3 sa pogonskim zupčanicom te svim bitnim oznakama



Slika 7.3. Vratilo broj 3

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr2} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{dop}}} \quad (7.13)$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt-0}}{10 \dots 12}, \quad (7.14)$$

$R_{dt-0} = 435 \text{ N/mm}^2$ – trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320

$$\tau_{dop} = \frac{435}{12}$$

$$\tau_{dop} = 36,25 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr2} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 59567,008}{\pi \cdot 36,25}}$$

$$d_{vr2} = 203,03 \text{ mm}$$

Usvajamo $d_{vr2} = 224 \text{ mm}$

Ležaje biramo pomoću sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt} \quad (7.15)$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} - \text{obodna sila} \quad (7.16)$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 59567,008 \cdot 10^3}{201,923}$$

$$F_{wt} = 589997,25 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 589997,25 \cdot \tan(21,42)$$

$$F_r = 231455,0068 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w \quad (7.17)$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta \quad (7.18)$$

$$\tan \beta_w = \frac{500}{498,677} \cdot \tan 20$$

$$\tan \beta_w = 0,3649$$

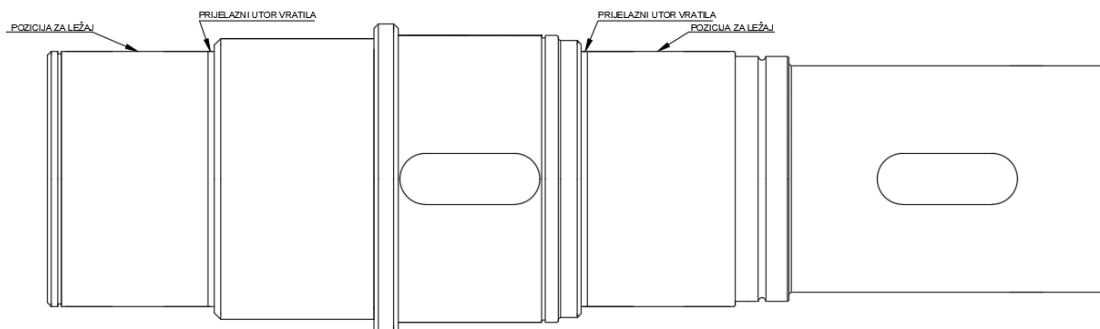
pa je:

$$F_a = 589997,25 \cdot 0,3649$$

$$F_a = 215289,996 \text{ N}$$

7.4 Vratilo 4

Na slici 7.4. se nalazi slika vratila 4 sa pogonskim zupčanikom te svim bitnim oznakama



Slika 7.4. Vratilo broj 4

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{dop}}} \quad (7.19)$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt-0}}{10 \dots 12}, \quad (7.20)$$

$R_{dt-0} = 435 \text{ N/mm}^2$ – trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320

$$\tau_{dop} = \frac{435}{12}$$

$$\tau_{dop} = 36,25 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 227827,5}{\pi \cdot 36,25}}$$

$$d_{vr1} = 317,51 \text{ mm}$$

Usvajamo $d_{vr1} = 355 \text{ mm}$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt} \quad (7.21)$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} - \text{obodna sila} \quad (7.22)$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 227827,5 \cdot 10^3}{326,214}$$

$$F_{wt} = 365202,033 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 365202,033 \cdot \tan(22,66)$$

$$F_r = 152467,83 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w \quad (7.23)$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta \quad (7.24)$$

$$\tan \beta_w = \frac{500}{498,677} \cdot \tan 20$$

$$\tan \beta_w = 0,3649$$

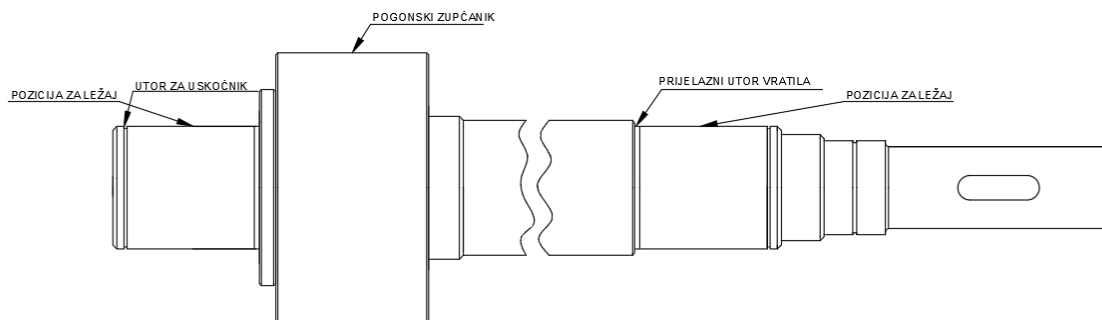
pa je:

$$F_a = 365202,033 \cdot 0,3649$$

$$F_a = 133262,22 \text{ N}$$

7.5 Vratilo 5 – pomoćni izlaz

Na slici 7.5. se nalazi slika pomoćnog vratila sa pogonskim zupčanicom te svim bitnim oznakama



Slika 7.5. Pomoćno vratilo

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{dop}}} \quad (7.25)$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt-0}}{10 \dots 12}, \quad (7.26)$$

$R_{dt-0} = 435 \text{ N/mm}^2$ – trajna dinamička čvrstoća za materijal Č4320

$$\tau_{dop} = \frac{435}{12}$$

$$\tau_{dop} = 36,25 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 31,83}{\pi \cdot 36,25}}$$

$$d_{vr1} = 16,475 \text{ mm}$$

Usvajamo $d_{vr1} = 40 \text{ mm}$

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt} \quad (7.27)$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} - \text{obodna sila} \quad (7.28)$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 31,83 \cdot 10^3}{116,771}$$

$$F_{wt} = 545,17 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 545,17 \cdot \tan(20,7)$$

$$F_r = 206 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w \quad (7.29)$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta \quad (7.30)$$

$$\tan \beta_w = \frac{295}{294,43} \cdot \tan 12$$

$$\tan \beta_w = 0,213$$

pa je:

$$F_a = 545,17 \cdot 0,213$$

$$F_a = 116,12 \text{ N}$$

8. IZBOR PERA

8.1 Vratilo 1

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d, \quad (8.1)$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t_1)p_{dop}}, \quad (8.2)$$

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), $p_{dop} = 140$ Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 3839,2}{90 \cdot (14 - 4,6) \cdot 140}$$

$$l \geq 64,829 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

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

$$h = 14 \text{ mm}$$

$$t = 8,7 \text{ mm}$$

$$t_1 = 4,6 \text{ mm}$$

$$t_2 = 5,4 \text{ mm}$$

8.2 Vratilo 2

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d, \quad (8.3)$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t_1)p_{dop}}, \quad (8.4)$$

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), $p_{dop} = 140$ Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 14969,97}{140 \cdot (20 - 6,9) \cdot 140}$$

$$l \geq 116,617 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 36 \text{ mm}$$

$$h = 20 \text{ mm}$$

$$t = 12,3 \text{ mm}$$

$$t_1 = 6,9 \text{ mm}$$

$$t_2 = 7,9 \text{ mm}$$

8.3 Vratilo 3

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d, \quad (8.5)$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t_1)p_{dop}}, \quad (8.6)$$

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), $p_{dop} = 140$ Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 59567,008}{224 \cdot (28 - 10,1) \cdot 140}$$

$$l \geq 212,23 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 50 \text{ mm}$$

$$h = 28 \text{ mm}$$

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

$$t_1 = 10,1 \text{ mm}$$

$$t_2 = 11,2 \text{ mm}$$

8.4 Vratilo 4

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d, \quad (8.7)$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t_1)p_{dop}}, \quad (8.8)$$

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), $p_{dop} = 140$ Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 227827,5}{355 \cdot (40 - 14,5) \cdot 140}$$

$$l \geq 359,533 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

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

$$h = 40 \text{ mm}$$

$$t = 24,6 \text{ mm}$$

$$t_1 = 14,5 \text{ mm}$$

$$t_2 = 15,6 \text{ mm}$$

8.5 Vratilo 5 – pomoćno vratilo

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d, \quad (8.9)$$

pri čemu je:

l – duljina pera

d – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t_1)p_{dop}}, \quad (8.10)$$

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), $p_{dop} = 140$ Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 31,83}{40 \cdot (8 - 2,6) \cdot 140}$$

$$l \geq 2,105 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 12 \text{ mm}$$

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

$$t = 4,9 \text{ mm}$$

$$t_1 = 2,6 \text{ mm}$$

$$t_2 = 3,2 \text{ mm}$$

9. ZAKLJUČAK

Početak procesa projektiranja reduktora obuhvaća izračunavanje momenata i brzina vrtnje za sva tri stupnja reduktora, kao i za pomoćni stupanj, koristeći podatke koji su nam zadani u zadatku.

Svaki stupanj se proračunava odvojeno, počevši od projektiranog i kontrolnog proračuna, a zatim se izračunava promjer vratila, odabir i proračun ležajeva, odabir pera, te odabir ulja za podmazivanje i hlađenje. Prije projektnog proračuna za svaku fazu, odabire se materijal za zupčanike, a kasnije i materijal za vratilo.

Nakon završenog proračuna, odabire se materijal i oblik kućišta, te sustav za podmazivanje i hlađenje. Prije konstruiranja kućišta, izrađuje se skica s rasporedom zupčanika i vratila kako bi se dobio približan, ali optimalan dizajn. Tijekom konstruiranja kućišta, odabiru se standardni elementi poput vijaka, odvoda ulja, uljnih mjerača i odvoda ulja, dok se istovremeno konstruiraju vratila i odabiru elementi poput radijalnih brtvi, O-prstena i uskočnika.

Uspješno smo izračunali i konstruirali trostupanjski reduktor na način koji ispunjava zahtjeve industrijske primjene, omogućujući istovremeno jeftinu i jednostavnu proizvodnju.

10. LITERATURA

- [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*
- [6] – Hercigonja Eduard: *Strojni elementi 1 i 2, udžbenik za srednje strojarske škole, XIII. dopunjeno izdanje, Zagreb, 2005.*

11. SAŽETAK

Zadatak koji je bio postavljen bio je konstrukcija trostupanjskog reduktora sa kosim zubima koji je uključivao pomoćni izlaz. Materijal koji je korišten za izradu zupčanika i vratila bio je Č4320, dok je kućište bilo izrađeno od materijala NL700. Proračun je bio proveden stupnjevito.

Pogonski zupčanici su bili integrirani sa vratilima. Kako bi se nosili s velikim težinama vratila i zupčanika odabrani su adekvatni ležajevi. Na određenim vratilima pero je bilo šire od širine zupčanika te smo ga morali redimenzionirati te staviti dva pera u razmaku 120° od jednog naprema drugome. Zupčanici i vratila su bili obrađeni postupkom kovanja, a daljnja obrada, prema potrebi, uključivala je tokarenje, glodanje, brušenje i bušenje. Za podmazivanje i hlađenje zupčanika su korištene brizgaljke u obliku bakrenih cijevi koje su prskale ulje na zahvat zupčanika.

Ključne riječi: trostupanjski reduktor, zupčani prijenos

12. SUMMARY

The task that was set was the construction of a three-stage reduction gearbox that included an auxiliary outlet. The material used to make the gears and shafts was Č4320, while the housing was made of NL700 material. The process was implemented in stages. The drive gears were integrated with the shafts. Adequate bearings were selected in order to cope with the heavy weight of the shafts and gears. On certain shafts, the key was wider than the width of the gear, so we had to resize it and place two keys at a distance of 120° from one to the other. The gears and shafts were machined by a forging process, and further machining, as required, included turning, milling, grinding and drilling. For lubrication and cooling of the gears, nozzles in the form of copper pipes were used, which sprayed oil on the engagement of the gears.

Key words: three stage reduction gearbox, gear transmission

13. PRILOZI

1. Sklopni crtež – trostupanjski reduktor sa pomoćnim izlazom
2. Radionički crtež donjeg dijela kućiša
3. Radionički crteži vratila i zupčanika
4. Specifikacije ležajeva u pdf-u sa SKF-a