

Dvostruki dvostupanjski horizontalni reduktor

Hudoletnjak, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:190:899187>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplmoski stručni studij strojarstva

ZAVRŠNI RAD
DVOSTUPANJSKI DVOSTRUKI HORIZONTALNI
REDUKTOR

Rijeka, rujan 2022.

Dominik Hudoletnjak

0069083101

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

ZAVRŠNI RAD

**DVOSTUPANJSKI DVOSTRUKI HORIZONTALNI
REDUKTOR**

Mentor: doc.dr.sc.Željko Vrcan

Rijeka, rujan 2022.

Dominik Hudoletnjak

Rijeka, 10. ožujka 2021.

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

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

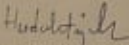
Pristupnik: **Dominik Hudoletnjak (0069083101)**
Studij: **Preddiplomski stručni studij strojarstva**

Zadatak: **Dvostruki dvostupanjski horizontalni reduktor / Double two-stage horizontal reduction gear**


Ops zadataka:

Projektirati dvostupanjski horizontalni reduktor za primjenu u industriji, s kosim ozubljenjem i 2 paralelna izlazna vratila. Broj okretaja pogonskog stroja iznosi 3490 min⁻¹. Prijenosni omjer prema izlaznom vratilu 1 $i = 34$, uz priključenu snagu $P = 280$ kW. Prijenosni omjer prema izlaznom vratilu 2 $i = 16$ uz priključenu snagu $P = 240$ 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:



Doc. dr. sc. Željko Vrcan

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Robert Basan

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

IZJAVA

Ja, Dominik Hudoletnjak, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad „Dvostupanjski dvostruki horizontalni reduktor“ pod vodstvom mentora doc.dr.sc. Ž. Vrcan dipl.ing.

Zahvalio bih se mentoru doc.dr.sc. Ž. Vrcan dipl.ing. na uputama i pomoći koju mi je pružio pri izradi ovog završnog rada.



SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	TIJEK RADA.....	2
3.	PRORAČUN OSNOVNIH PARAMETARA.....	3
3.1	Brzine vrtnje vratila	3
3.2.	Određivanje momenata	3
4.	PRORAČUN DVOSTUPANJSKOG DVOSTRUKOG HORIZONTALNOGA REDUKTORA.....	4
4.1	Razmak osi zupčastog para međuvratila 1-4.....	4
4.2	Izbor modula.....	6
4.3	Broj zubi pogonskog zupčanika	6
4.4	Točan (računski) prijenosni omjer	6
4.5	Diobeni promjeri	7
4.6	Teoretski razmak osi.....	7
4.7	Širina zupčanika	7
4.8	Stupanj prekrivanja koraka.....	8
4.9	Suma faktora pomaka profila	8
4.10	Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG.....	8
4.11	Promjer preko korijena zuba	9
4.12	Promjeri preko glave zuba.....	9
4.13	Promjer temeljnih krugova.....	10
4.14	Promjeri pogonskih krugova	10
4.15	Stupanj prekrivanja profila	10
4.16	Kosi zubi.....	10
4.17	Debljina vrha zuba u normalnom presjeku	11
4.18	Relativna debljina vrhi zuba	11
5.	KONTROLNI PRORAČUN	12
5.1	Faktor zone	12
5.2	Faktor nagiba zuba	12
5.3	Faktor utjecaja prekrivanja za zupčanike sa ravnim zubima	12
5.4	Tangencijalna sila	12



5.5	Obodna brzina zupčanika	13
5.6	Hrapavost boka zuba	13
5.7	Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba	13
5.8	Faktor utjecaja veličine očitane iz tablice.....	14
5.9	Fiktivni broj zuba	14
5.10	Faktor zahvata na vrhu zuba	14
5.11	Faktor kuta nagiba.....	14
5.12	Faktor stupnja prekrivanja profila	15
5.13	Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba	15
5.14	Sigurnost protiv loma	15
5.15	Faktor veličine zupčanika	16
5.16	Bočna zračnost zuba.....	16
5.17	Tetivna mjera debljine zubi	17
5.18	Izbor ulja za podmazivanje	18
5.19	Tangencijalna sila	18
5.20	Stribeckov pritisak	18
5.21	Potrebna viskoznost ulja	18
5.22	Izbor i kontrola trajnosti ležajeva.....	18
5.23	Minimalni promjer gonjenog vratila	19
5.24	Sile na ozubljenju.....	19
5.25	Obodna sila.....	20
5.26	Radikalna sila.....	20
5.27	Aksijalna sila	20
5.28	Trajnost ležajeva.....	21
5.29	Kontrola klinova i pera	21
6.	RAZMAK OSI ZUPČASTOG PARA KOD IZLAZNOG VRATILA 1	23
6.1	Za poznati ulazni moment T_1 : [Nm].....	23
6.2	Faktor širine zupčanika.....	23
6.3	Razmak osi zupčastog para međuvratila 1	24
6.4	Izbor modula.....	24
6.5	Broj zubi pogonskog zupčanika	24
6.6	Diobeni promjeri	25
6.7	Teoretski razmak osi.....	25



6.8	Širina zupčanika.....	25
6.9	Stupanj prekrivanja koraka.....	26
6.10	Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku.....	26
6.11	Suma faktora pomaka profila.....	26
6.12	Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG.....	26
6.13	Ekvivalenti brojevi zubi.....	27
6.14	Promjer preko korijena zuba.....	27
6.15	Promjeri preko glave zuba.....	27
6.16	Promjer temeljnih krugova.....	28
6.17	Promjeri pogonskih krugova.....	28
6.18	Stupanj prekrivanja profila.....	28
6.19	Kosi zubi.....	28
6.20	Debljina vrha zuba u normalnom presjeku.....	29
6.21	Relativna debljina vrhi zuba.....	29
7.	KONTROLNI PRORAČUN IZLAZNOG VRATILA 1.....	30
7.1	Nosivost boka zuba.....	30
7.2	Faktor zone.....	30
7.3	Faktor nagiba zuba.....	30
7.4	Faktor utjecaja prekrivanja za zupčanike sa ravnim zubima.....	30
7.5	Tangencijalna sila.....	31
7.6	Obodna brzina zupčanika.....	31
7.7	Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba.....	31
7.8	Faktor utjecaja veličine očitane iz tablice.....	32
7.9	Fiktivni broj zuba.....	32
7.10	Faktor zahvata na vrhu zuba.....	32
7.11	Faktor kuta nagiba.....	33
7.12	Faktor stupnja prekrivanja profila.....	33
7.13	Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba.....	33
7.14	Sigurnost protiv loma.....	33
7.15	Faktor veličine zupčanika.....	34
7.16	Bočna zračnost zuba.....	34
7.17	Tetivna mjera debljine zubi.....	35
7.18	Izbor ulja za podmazivanje.....	36



7.19	Tangencijalna sila	36
7.20	Stribeckov pritisak	36
7.21	Potrebna viskoznost ulja	36
7.22	Izbor i kontrola trajnosti ležajeva	37
7.23	Minimalni promjer gonjenog vratila	37
7.24	Sile na ozubljenju.....	38
7.25	Obodna sila.....	38
7.26	Radijalna sila.....	38
7.27	Aksijalna sila	38
7.28	Trajnost ležajeva.....	39
7.29	Kontrola klinova i pera	40
8.	RAZMAK OSI ZUPČASTOG PARA MEĐUVRATILA 3-4:.....	41
8.1	Razmak osi zupčastog para međuvratila 1	42
8.2	Izbor modula.....	42
8.3	Broj zubi pogonskog zupčanika	42
8.4	Broj zubi gonjenog zupčanika.....	42
8.5	Točan (računski) prijenosni omjer	42
8.6	Diobeni promjeri	43
8.7	Teoretski razmak osi.....	43
8.8	Širina zupčanika.....	43
8.9	Stupanj prekrivanja koraka.....	44
8.10	Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku.....	44
8.11	Suma faktora pomaka profila	44
8.12	Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG.....	45
8.13	Ekvivalentni brojevi zubi.....	45
8.14	Promjer preko korijena zuba	45
8.15	Promjeri preko glave zuba.....	45
8.16	Promjer temeljnih krugova.....	46
8.17	Promjeri pogonskih krugova	46
8.18	Stupanj prekrivanja profila	46
8.19	Kosi zubi.....	47
8.20	Debljina vrha zuba u normalnom presjeku	47
8.21	Relativna debljina vrhi zuba	47



9.	KONTROLNI PRORAČUN ZUPČASTOG PARA 3-4	48
9.1	Nosivost boka zuba.....	48
9.2	Faktor zone.....	48
9.3	Faktor nagiba zuba	48
9.4	Faktor utjecaja prekrivanja za zupčanike sa ravnim zubima.....	48
9.5	Tangencijalna sila	48
9.6	Obodna brzina zupčanika	49
9.7	Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba	49
9.8	Faktor utjecaja veličine očitane iz tablice.....	50
9.9	Nosivost korijena zuba	50
9.10	Faktor zahvata na vrhu zuba	50
9.11	Faktor kuta nagiba.....	51
9.12	Faktor stupnja prekrivanja profila.....	51
9.13	Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba	51
9.14	Sigurnost protiv loma	51
9.15	Faktor veličine zupčanika	52
9.16	Bočna zračnost zuba.....	52
9.17	Tetivna mjera debljine zubi	53
9.18	Izbor ulja za podmazivanje	54
9.19	Tangencijalna sila	54
9.20	Stribeckov pritisak	54
9.21	Potrebna viskoznost ulja	54
9.22	Izbor i kontrola trajnosti ležajeva.....	54
9.23	Minimalni promjer gonjenog vratila	55
9.24	Sile na ozubljenju.....	56
9.25	Obodna sila.....	56
9.26	Radikalna sila.....	56
9.27	Aksijalna sila	56
9.28	Trajnost ležajeva.....	57
9.29	Kontrola klinova i pera	58
10.	RAZMAK OSI ZUPČASTOG PARA 4-4 KOD IZLAZNOG VRATILA 2.....	59
10.1	Razmak osi zupčastog para međuvratila 1	60
10.2	Izbor modula.....	60



10.3	Broj zubi pogonskog zupčanika	60
10.4	Broj zubi gonjenog zupčanika	60
10.5	Diobeni promjeri	61
10.6	Teoretski razmak osi	61
10.7	Širina zupčanika	61
10.8	Stupanj prekrivanja koraka	62
10.9	Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	62
10.10	Suma faktora pomaka profila	62
10.11	Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG	63
10.12	Ekvivalenti brojevi zubi	63
10.13	Promjer preko korijena zuba	63
10.14	Promjeri preko glave zuba	63
10.15	Promjer temeljnih krugova	64
10.16	Promjeri pogonskih krugova	64
10.17	Stupanj prekrivanja profila	65
10.18	Debljina vrha zuba u normalnom presjeku	65
10.19	Relativna debljina vrhi zuba	65
11.	KONTROLNI PRORAČUN ZUPČASTOG PARA 4-4	67
11.1	Nosivost boka zuba	67
11.2	Faktor zone	67
11.3	Faktor nagiba zuba	67
11.4	Faktor utjecaja prekrivanja za zupčanike sa ravnim zubima	67
11.5	Tangencijalna sila	67
11.6	Obodna brzina zupčanika	68
11.7	Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba	68
11.8	Faktor utjecaja veličine očitane iz tablice	69
11.9	Fiktivni broj zuba	69
11.10	Faktor zahvata na vrhu zuba	69
11.11	Faktor stupnja prekrivanja profila	70
11.12	Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba	70
11.13	Sigurnost protiv loma	70
11.14	Dinamička čvrstoća korijena zuba iz tablice materijala	71
11.15	Faktor veličine zupčanika	71



11.16	Bočna zračnost zuba	71
11.17	Tetivna mjera debljine zubi	72
11.18	Izbor ulja za podmazivanje	73
11.19	Tangencijalna sila	73
11.20	Stribeckov pritisak	73
11.21	Potrebna viskoznost ulja	73
11.22	Izbor i kontrola trajnosti ležajeva	74
11.23	Minimalni promjer gonjenog vratila.....	74
11.24	Sile na ozubljenju.....	75
11.25	Radijalna sila.....	75
11.26	Aksijalna sila	75
11.27	Trajnost ležajeva.....	76
11.28	Kontrola klinova i pera	77
12.	IZBOR ULJA ZA PODMAZIVANJE I SUSTAVA HLAĐENJA ULJA.....	78
12.1	Konstrukcija sustava za hlađenja.....	78
13.	ZAKLJUČAK.....	79
14.	LITERATURA.....	80
15.	POPIS KORIŠTENIH OZNAKA	81
16.	SAŽETAK.....	83
17.	Prilozi	84





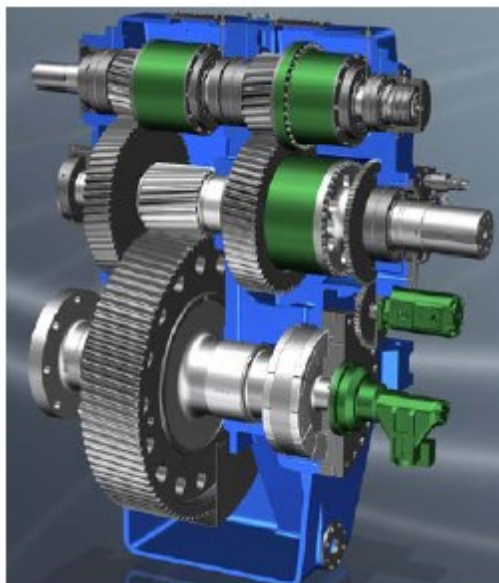
1. UVOD

Reduktor je mehanički prijenosnik snage koji koristi pretvarač brzine u stupnju prijenosa za usporavanje broja okretaja motora do željenog broja okretaja. Funkcija reduktora je uglavnom smanjiti brzinu te povećati izlazni moment. Omjer izlaznog momenta je proporcionalan izlazu motora. Usporavanje također smanjuje inerciju opterećenja, a smanjenje inercije je kvadrat redukcijskog omjera. Prijenos snage i gibanje se ostvaruje posebnim oblikom njegovih dijelova poput zupčanika ili trenjem remenom. Prijenosni omjer kod reduktora je veći od jedan. Reduktere primjenjujemo u gotovo svim granama industrije. U industriji nam služi kao prijenosnik snage, podizanje, transport. Dobro poznavanje strojarske pozadine vrlo je bitno kod odabira odgovarajućeg reduktora. Faktori koji nam utječu kod samog odabira reduktora su tip reduktora, redukcijski omjer, okretni moment, veličina, opterećenja, servisni faktor, broj radnih sati.

Funkcija kućišta reduktora je osigurati odgovarajuću potporu ležajevima te spremnik ulja za prisilno podmazivanje zupčanika. Sva opterećenja ležajeva se nalaze u ravninama okomitima na os vratila. U mnogim slučajevima, posebno kod spoja sa dvostupanjskim reduktorima, kućište ležaja mora podupirati ležajeve pri različitim nagibima. Važno je da potporni sklop ima odgovarajuću čvrstoću konstrukcije kako bi se spriječila pojava bilo koje vrste mjerljivog savijanja zbog djelovanja različitog opterećenja.

Treba imati na umu da je za dobar rad reduktora i minimalno trošenje zupčanika potrebno da vratila rade kontinuirano i paralelno jedan u odnosu na drugi. Konstrukcija kućišta reduktora je jedan od načina da se osigura centriranje osovina pogonskog i pogonjenog stroja u odnosu na reduktor.

Problemi u radu reduktora uzrokovani su i zbog pretjerane krutosti spojke te neodgovarajućeg centriranja te su zato potrebna stalna unaprijeđenja konstrukcije i razmjena iskustava između operatera, održavatelja i konstruktora kako bi se omogućila zadovoljavajuća ugradnja. Prilikom ugradnje treba ispoštovati potrebne procedure i preporuke proizvođača opreme te primijeniti dobru praksu tijekom centriranja.



Slika 1.1 Primjer dvostupanjskog reduktora

2. TIJEK RADA

Zadatak je bio izraditi dvostupanjski dvostruki horizontalni reduktor. Najprije se kreće sa proračunom, izračunaju se sve vrijednosti potrebne za izradu tehničkih nacrti reduktora te se nakon toga crta sklopni dio reduktora. Prvo se crtaju zupčanici u zahvatu, a kasnije i samo kućište. Kada se dobije odgovarajući oblik kućišta, crtamo vratila sa zupčanicima. Pomoću skfa i zadanih vrijednosti odabiru se ležajevi i brtve iz kataloga. Na kraju se crtaju tehnički nacrti samih vratila. Zatim popunjavamo tablice u AutoCadu sa odgovarajućim vrijednostima iz samog gearpacka te prebacujemo nacрте u pdf format.



3. PRORAČUN OSNOVNIH PARAMETARA

Zadani podaci dvostupanjskog dvostrukog horizontalnoga reduktora :

- Izlazna snaga $P_1 = 280 \text{ kW}$
- Izlazna snaga $P_2 = 240 \text{ k W}$
- Ulazna brzina vrtnje $n = 3490 \text{ min}^{-1}$
- Prijenosni omjeri $i_1 = 34$
 $i_2 = 16$
- Temperatura okoline $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
- Trajnost ležaja $L_h = 12000 \text{ h}$

3.1 Brzine vrtnje vratila

$$n_2 = \frac{n_1}{i} = \frac{3490}{4} = 872.50 \text{ min}^{-1}$$

$$n_3 = \frac{n_2}{i} = \frac{872.50}{4} = 218,125 \text{ min}^{-1}$$

$$n_4 = \frac{n_1}{i} = \frac{3490}{5.83} = 595.19 \text{ min}^{-1}$$

$$n_5 = \frac{n_4}{i} = \frac{595.19}{5.83} = 101.88 \text{ min}^{-1}$$

3.2. Određivanje momenata

$$T_1 = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{240000}{365,47} = 656.685 \text{ Nm}$$

$$T_2 = T_1 \times i_1 = 656.685 \times 4 = 2656.590 \text{ Nm}$$

$$T_3 = T_2 \times i_1 = 2656.590 \times 4 = 10632.040 \text{ Nm}$$

Za drugu stranu dvostupanjskog horizontalnog reduktora:

$$T_1 = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{280000}{365,47} = 766.133 \text{ Nm}$$



$$T_2 = T_1 \times i_1 = 766.133 \times 5.83 = 4492.323 \text{ Nm}$$

$$T_3 = T_2 \times i_2 = 4492.323 \times 5.83 = 26244.540 \text{ Nm}$$

ω_1 – kutna brzina 1.stupnja

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3490}{60} = 365.47 \text{ rad}^{-1}$$

ω_2 – kutna brzina 2.stupnja

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 872.50}{60} = 90.34 \text{ rad}^{-1}$$

ω_3 – kutna brzina 1.stupnja

$$\omega_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3490}{60} = 365.47 \text{ rad}^{-1}$$

ω_4 – kutna brzina 2.stupnja

$$\omega_4 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 595.19}{60} = 62.33 \text{ rad}^{-1}$$

4. PRORAČUN DVOSTUPANJSKOG DVOSTRUKOG HORIZONTALNOGA REDUKTORA

Zadani podaci dvostupanjskog dvostrukog horizontalnoga reduktora:

- Izlazna snaga $P_1 = 280 \text{ kW}$
- Izlazna snaga $P_2 = 240 \text{ kW}$
- Ulazna brzina vrtnje $n = 3490 \text{ min}^{-1}$
- Prijenosni omjeri $i_1 = 34$
 $i_2 = 16$
- Temperatura okoline $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
- Trajnost ležaja $L_h = 12000 \text{ h}$

4.1 Razmak osi zupčastog para međuvratila 1-4

Za poznati ulazni moment T_1 : [Nm]



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

Za vrstu ozubljenja ravnih zubi zupčanika uzimamo iz tablice:

$$K_1 = 6840$$

$$K_2 = 320$$

Faktor širine zupčanika:

$$\psi_{bd} \approx (0,1 \dots 0,3 \dots 0,5) + \frac{i_z}{20}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \left(\frac{4}{20}\right)$$

Za zupčanike sa mekim zubima (konstrukcijski čelik):

$$\psi_{bd} = 0,7 \leq 1,6$$

Faktor primjene: $K_A = 1,5$

Faktor dodatnih dinamičkih opterećenja: $K_v = 1,1$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu: $K_{H\alpha} = 1.065$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba u zahvatu: $K_{H\beta} = 1.280$

Minimalna sigurnost na pitting: $S_{Hmin} = 1,1$

Materijal: materijal iz tablice pod tipom materijala čelici za cementaciju s termičkom obradom cementacija + kaljenje : Č4321

Trajna dinamička čvrstoća površine boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1480 \text{ Mpa}$

Razmak osi zupčastog para međuvratila 1:

$$a \geq 320 \cdot (4+1) \sqrt[3]{\frac{656.69}{0,7} \cdot \frac{4+1}{4} \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,065 \left(\frac{1,1}{1480}\right)^2}$$

$$a \geq 175,373$$



Usvojeni razmak osi: $a = 178$ [mm]

4.2 Izbor modula

$$m \approx 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2} = 0,1 \cdot \frac{178 \cdot 4}{(1+4)^2}$$

$$m = 2.848 \text{ mm}$$

Usvojeni razmak osi: $m = 3 \text{ mm}$

Nagib zuba: $\beta = 17^\circ$

4.3 Broj zubi pogonskog zupčanika

$$z_1 = \frac{2a \cos \beta}{m(i_z + 1)} = \frac{2 \cdot 178 \cos(17^\circ)}{3 \cdot (4 + 1)} = 22.6963$$

Broj zubi pogonskog zupčanika zaokružujemo na manji cijeli broj: $z_1 = 22$

Broj zubi gonjenog zupčanika: $z_2 = i_z \cdot z_1 = 4 \cdot 22 = 88,00$

Usvojeni broj zubi gonjenog zupčanika: $z_2 = 88,00$

Broj zuba zaokružujemo na veći cijeli broj: $z_2 = 89$

4.4 Točan (računski) prijenosni omjer

$$u = i = \frac{89}{22}$$

$$u = i = 4.045$$

Odstupanje od i_z :

$$\Delta i = \left(1 - \frac{i_z}{i}\right) = \left(1 - \frac{4}{4.045}\right)$$

$$\Delta i = 0.01124 < 0,025$$



4.5 Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{3 \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{3 \cdot 22}{\cos(17^\circ)} = 69.016$$

Usvojeno:

$$d_1 = 70 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m \cdot z_2}{\cos \beta} = \frac{5 \cdot 88}{\cos(17^\circ)}$$

$$d_2 = 279.199 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_2 = 280 \text{ mm}$$

4.6 Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{69.016 + 279.199}{2}$$

$$a_d = 174.107 \text{ mm}$$

$$a_d < a \quad a - a_d = 3.892 < 5 \text{ mm}$$

4.7 Širina zupčanika

Širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1 = 0.7 \cdot 69.016$$

$$b = b_2 = 48.311 \text{ mm}$$

Usvojena širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = 50 \text{ mm}$$

$$b_1 = b + 5 = 50 + 5 = 55 \text{ mm}$$

$$b_1 = 55 \text{ mm}$$



4.8 Stupanj prekrivanja koraka

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{b \sin \beta}{\pi m_n} = \frac{55 \cdot 0.292371705}{\pi \cdot 3}$$

$$\varepsilon_{\beta} = 1.551080068$$

Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku: $\alpha_n = 20^\circ$

Za ravne zube: $\alpha_t = \alpha_n = 20.837^\circ$

Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku:

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos \alpha_t\right) = \arccos\left(\frac{174,107}{178} \cos(20^\circ)\right)$$

$$\alpha_{wt} = 23.91337326^\circ$$

4.9 Suma faktora pomaka profila

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

$$\operatorname{inv} \alpha_{wt} = \tan \alpha_{wt} - \frac{\pi \alpha_{wt}}{180} = \tan(23.913^\circ) - \frac{\pi \cdot 23.913}{180} = 0.02605117602$$

$$\operatorname{inv} \alpha_t = \tan \alpha_t - \frac{\pi \alpha_t}{180} = \tan(20^\circ) - \frac{\pi \cdot 20}{180} = 0.01692924539$$

$$x_1 + x_2 = \frac{0.02605117602 - 0.01692924539}{2 \tan 20} \cdot (22 + 88) = 1.391 < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 1.3909576$$

4.10 Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG

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

$$x_1 = \frac{0.609392251 + 0.7815653}{2} + \frac{[1 - (0.609392251 + 0.7815653)] \ln 4}{2 \ln\left(\frac{22 \cdot 88}{100}\right)}$$

$$x_1 = 0.609392251$$



$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1 = 1.3909576 - 0.609392251$$

$$x_2 = 0.7815653$$

Ekvivalentni brojevi zubi:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} = \frac{22}{\cos^2(0,005) \cdot \cos(17^\circ)} = 24.0509$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} = \frac{88}{\cos^2(0,005) \cdot \cos(17^\circ)} = 99.34$$

4.11 Promjer preko korijena zuba

$$d_{f1} = m \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2x_1 - 2,5 \right) = 3 \left(\frac{22}{\cos(17^\circ)} + 2 \cdot 0.609392251 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 65.172 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2x_2 - 2,5 \right) = 3 \left(\frac{88}{\cos(17^\circ)} + 2 \cdot 0.7815653 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 276.389 \text{ mm}$$

4.12 Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2} - 0,5 \text{ mn}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 178 - 276.389 - 0,5 \cdot 3 = 78,111 \text{ mn}$$

Usvojeno:

$$d_{a1} = 78.500 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1} - 0,5 \text{ mn}$$

Usvojeno:

$$d_{a2} = 289.500 \text{ mm}$$



4.13 Promjer temeljnih krugova

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

$$d_{b1} = 69.016 \cdot \cos(20.837^\circ)$$

$$d_{b1} = 64.502 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t = 279.200 \cdot \cos(20.837^\circ)$$

$$d_{b2} = 260.939 \text{ mm}$$

4.14 Promjeri pogonskih krugova

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

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 178}{4+1}$$

$$d_{w1} = 70.559 \text{ mm}$$

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

$$d_{w2} = 2 \cdot 178 - 70.559$$

$$d_{w2} = 285.441 \text{ mm}$$

4.15 Stupanj prekrivanja profila

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{3}{\cos(17^\circ)}$$

$$m_t = 3.137075269 \text{ mm}$$

4.16 Kosi zubi

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



$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{78.111^2 - 64.854^2} + \sqrt{289.328^2 - 262.362^2} - 2 \cdot 178 \cdot \sin(23.913^\circ)}{2\pi \cdot 3 \cdot \cos(20.837^\circ)}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1.258 \geq 1,1$$

4.17 Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

$$S_{an1} = d_{a1} \left(\frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2Z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

$$S_{an1} = 78.111 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0.609392251 \cdot \tan(20^\circ)}{2 \cdot 22} + 0.01692924539 - 0.0800932825722099 \right) \cdot$$

$$\cos(19.086^\circ) = 2.164 \text{ mm}$$

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

$$\alpha_{at1} = \arccos \left(\frac{64.854}{78.500} \right) = 33.87304525^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right) = \arctan \left(\frac{78.500}{69.016} \tan(17^\circ) \right) = 19.087^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180} = \tan(33.873^\circ) - \frac{\pi \cdot 33.873^\circ}{180} = 0.0801$$

4.18 Relativna debljina vrhi zuba

$$S_{an2} = d_{a2} \cdot \left(\frac{\pi + 4x_2 \tan \alpha_n}{2Z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$

$$S_{an2} = 289.328 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0.7815653 \cdot \tan(20^\circ)}{2 \cdot 88} + 33.873 - 0.0297 \right) \cdot \cos \beta_{a2}$$

$$S_{an2} = 3.1022 \text{ mm}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \left(\frac{262.362}{289.328} \right) = 24.934^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right) = \arctan \left(\frac{289.328}{279.200} \right) \cdot \tan(17^\circ) = 17.579^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180} = \tan(24.933^\circ) - \frac{\pi \cdot 24.933^\circ}{180} = 0.029723833$$



5. KONTROLNI PRORAČUN

Kontaktни притисак (Hertzov) на бочовима спрегнутих зупчаника:

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

Faktor modula elastičnosti za čelik iznosi: $Z_E = 189.72 \sqrt{\text{MPa}}$

5.1 Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20)} \sqrt{\frac{2 \cos(0,005^\circ)}{\tan(23.914^\circ)}}$$

$$Z_H = 2.23$$

5.2 Faktor nagiba zuba

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

$$Z_\beta = 0.98$$

5.3 Faktor utjecaja prekrivanja za zupčаниke sa ravnim zubima

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{4 - \epsilon_\alpha}{3}} = \sqrt{\frac{4 - 1.696}{3}}$$

$$Z_\epsilon = 0,84$$

5.4 Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1}$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 656,69}{69,06}$$



$$F_t = 19030.175 \text{ N}$$

Faktor primjene: $K_A = 1,5$

5.5 Obodna brzina zupčanika

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{69.016 \cdot 3490.00}{19100}$$

$$v_1 = 12.61 \frac{\text{m}}{\text{s}} < 14$$

Kvaliteta ozubljenja - dobiveno iz tablice: $Q = 6$

5.6 Hrapavost boka zuba

$$R_z = 3 \mu\text{m}$$

$$K_v = K_{v\alpha} = 1 + 1,8 Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 1,8 \cdot 6^2 \cdot 12.61 \cdot 22 \cdot 10^{-5}$$

$$K_v = K_{v\alpha} = 1.127$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu: $K_{H\alpha} = 1.065$

5.7 Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left(\frac{b}{d_1} \right)^2 + 0,0005b = 1,17 + 0,18 \left(\frac{55}{69,06} \right)^2 + 0,0005 \cdot 55$$

$$K_{H\beta} = 1.280$$

$$\sigma_H = 1135.08 \text{ MPa}$$

$$\text{Sigurnost na pitting: } S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{Hmin}$$

Minimalna sigurnost na pitting uzeta iz tablice materijala: $\sigma_{Hlim} = 1480 \text{ MPa}$

Hydroelastično – tribomehanički faktor: $Z_{LVR} = 1.01$

Faktor povećanja tvrdoće: $Z_W = 1.00$



5.8 Faktor utjecaja veličine očitane iz tablice

$$Z_X = 1.00$$

$$S_H = \frac{1480}{1135.08} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_H = 1.121 > 1.1 S_{Hmin}$$

$$\text{Naprezanje na savijanje: } \sigma_F = \frac{F_t}{b_m} Y_{FS} Y_\beta Y_\epsilon K_A K_V K_{Fa} K_{F\beta}$$

5.9 Fiktivni broj zuba

$$z_{n1} = 25$$

$$z_{n2} = 100$$

5.10 Faktor zahvata na vrhu zuba

$$Y_{FS1} = 4.08 + 0.18 \cdot x_1^2 + \frac{7.63}{Z_{n1}} - 15.94 \cdot \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4.08 + 0.18 \cdot 0.609^2 + \frac{7.63}{25} - 15.94 \cdot \frac{0.609}{25}$$

$$Y_{FS1} = 3.205$$

$$Y_{FS2} = 4.08 + 0.18 \cdot x_2^2 + \frac{7.63}{Z_{n2}} - 15.94 \cdot \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4.08 + 0.18 \cdot 0.7815653^2 + \frac{7.63}{100} - 15.94 \cdot \frac{0.7815653}{100}$$

$$Y_{FS2} = 3.476$$

5.11 Faktor kuta nagiba

$$Y_\beta = 1 - \frac{\epsilon_\beta \cdot \beta}{120} = 1 - \frac{1.427 \cdot 17^\circ}{120} = 0.86$$



5.12 Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\varepsilon} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_{\alpha}} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2(17^{\circ})}{1,696}$$

$$Y_{\varepsilon} = 0,79$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu: $K_{F\alpha} = 1,065$

5.13 Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\alpha}^{0,9} = 1,065^{0,9} = 1,240$$

$$\sigma_{F1} = \frac{19030,03}{55 \cdot 3} \cdot 3,205 \cdot 0,86 \cdot 0,79 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,065 \cdot 1,240$$

$$\sigma_{F1} = 584,105 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{F2} = \frac{19030,03}{55 \cdot 3} \cdot 3,476 \cdot 0,86 \cdot 0,79 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,065 \cdot 1,240$$

$$\sigma_{F2} = 672,625 \text{ Mpa}$$

5.14 Sigurnost protiv loma

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

$$S_F = 1,72$$

$$S_{Fmin} = 1,6 \dots 3$$

Reduktori su visoke pouzdanosti čiji lom može izazvati veće materijalne štete pa su teško dobavljivi rezervni dijelovi.

Dinamička čvrstoća korijena zuba iz tablice materijala: $\sigma_{FE} = 920 \text{ Mpa}$

Faktor osjetljivosti materijala na koncentratore naprezanja: $Y_{\delta} = 1$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba: $Y_R = 1$



5.15 Faktor veličine zupčanika

$$Y_X=1$$

$$S_{F1} = \frac{920}{584.105} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_{F1} = 1.575 \geq 1.1$$

$$S_{F2} = \frac{920}{672.625} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_{F2} = 1.368 \geq 1.1$$

5.16 Bočna zračnost zuba

$$A_{sne1} = -70 \mu\text{m}$$

$$A_{sne2} = -95 \mu\text{m}$$

$$T_{sn1} = 100 \mu\text{m}$$

$$T_{sn2} = 130 \mu\text{m}$$

$$A_{sni1} = A_{sne1} - T_{sn1} = -170 \mu\text{m}$$

$$A_{sni2} = A_{sne2} - T_{sn2} = -225 \mu\text{m}$$

$$A_{ae} = 20 \mu\text{m}$$

$$A_{ai} = -20 \mu\text{m}$$

$$j_{nmin} = -(A_{sne1} + A_{sne2}) \cos \alpha_n + 2A_{ai} \sin \alpha_n$$

$$j_{nmin} = -(-70 + (-95)) \cos(20^\circ) + 2 \cdot (-20) \sin(20^\circ)$$

$$j_{nmin} = 141 \mu\text{m}$$

$$j_{nmax} = -(A_{sni1} + A_{sni2}) \cos \alpha_n + 2A_{ae} \sin \alpha_n$$

$$j_{nmax} = -(-170 + (-225)) \cos(20^\circ) + 2 \cdot 20 \sin(20^\circ)$$



$$j_{\text{nmax}} = 385 \mu\text{m}$$

5.17 Tetivna mjera debljine zubi

$$k_1 = 3$$

$$k_2 = 10$$

$$W_k = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k - \frac{z}{2|z|} \right) \pi + z \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot x \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k1} = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k_1 - \frac{z_1}{2|z_1|} \right) \pi + z_1 \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot x_1 \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k1} = 3 \cdot \cos(20^\circ) \left[\left(3 - \frac{22}{2|22|} \right) \pi + 22 \cdot 0,592539281 \right] + 2 \cdot 0,609 \cdot 3 \cdot \sin(20^\circ)$$

$$W_{k1} = 33,300 \text{ mm}$$

$$W_{k2} = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k_2 - \frac{z_2}{2|z_2|} \right) \pi + z_2 \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot x_2 \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k2} = 3 \cdot \cos(20^\circ) \left[\left(12 - \frac{88}{2|88|} \right) \pi + 88 \cdot 0,592539281 \right] + 2 \cdot 0,7815653 \cdot 3 \cdot \sin(20^\circ)$$

$$W_{k2} = 116,554 \text{ mm}$$

$$A_{we} = 0,94 \cdot A_{sne}$$

$$A_{wi} = 0,94 \cdot A_{sni}$$

$$A_{we1} = 0,94 \cdot A_{sne1} = 0,94 \cdot (-175) = -65,8 \mu\text{m}$$

$$A_{we2} = 0,94 \cdot A_{sne2} = 0,94 \cdot (-95) = -89,3 \mu\text{m}$$

$$A_{wi1} = 0,94 \cdot A_{sni1} = 0,94 \cdot (-170) = -159,8 \mu\text{m}$$

$$A_{wi2} = 0,94 \cdot A_{sni2} = 0,94 \cdot (-225) = -211,5 \mu\text{m}$$



5.18 Izbor ulja za podmazivanje

Obodna brzina na diobenom krugu:

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{69.016 \cdot 3490}{19100} = 12.611 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

5.19 Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1}$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 656,69}{69,06}$$

$$F_t = 19030.03 \text{ N}$$

5.20 Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3 F_t}{b d_1} \frac{i+1}{i} = \frac{3 \cdot 19030.03}{55 \cdot 69,06} \cdot \frac{4+1}{4} = 22.428 \text{ Mpa}$$

5.21 Potrebna viskoznost ulja

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{k_s}{v} \right)^{0,418} = 208 \left(\frac{22.428}{12.611} \right)^{0,418} = 264.597 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

ulje- MOBILGEAR 632

5.22 Izbor i kontrola trajnosti ležajeva

Minimalni promjer pogonskog vratila:

$$d_{vr1} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{tdop}}}$$

$$T_1 = \frac{P^1}{\omega_1} = \frac{240 \cdot 10^3}{365,472} = 656.685 \text{ Nm}$$



$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 3490}{30} = 365,472$$

$$R_{dt-1} = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{tdop} = \frac{R_{dt-1}}{10 \dots 12} = \frac{300}{10} = 27,2727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{vr1} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 656,685}{\pi \cdot 27,27}}$$

$$d_{vr1} \geq 49,682 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_{vr1} = 50 \text{ mm}$$

5.23 Minimalni promjer gonjenog vratila

$$d_{vr2} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 T_2}{\pi \tau_{tdop}}}$$

$$T_2 = T_1 i = 656,685 \cdot 4 = 2656,590 \text{ Nm}$$

$$d_{vr2} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 2656,590}{\pi \cdot 27,27}}$$

$$d_{vr2} \geq 89,003$$

Usvojeno:

$$d_{vr2} = 90 \text{ mm}$$

5.24 Sile na ozubljenju

$$F_{bn} = F_{bn1} = F_{bn2} = \frac{F_t}{\cos \alpha_{wt}} = \frac{19030,03}{\cos(20,837^\circ)} = 55281,832 \text{ N}$$



5.25 Obodna sila

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot T_1}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 656.685}{70.559 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_{wt} = 18614.042 \text{ N}$$

5.26 Radijalna sila

$$F_r = F_{r1} = F_{r2} = F_{wt} \cdot \tan \alpha_w$$

$$F_r = 8253.806 \text{ N}$$

5.27 Aksijalna sila

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w = 5818.108 \text{ N}$$

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \tan \beta = 0.312565546$$

Reakcije u ležajevima:

$$A_z = \frac{F_r}{2} = 4126,908281 \text{ N}$$

$$B_z = \frac{F_r}{2} = 4126,908281 \text{ N}$$

$$A_x = \frac{F_{wt}}{2} = \frac{18614.042}{2} = 9307.021195 \text{ N}$$

$$B_x = \frac{F_{wt}}{2} = \frac{18614.042}{2} = 9307.021195 \text{ N}$$

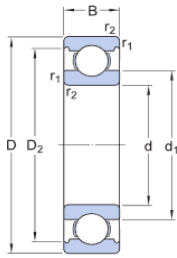
Ukupne reakcije u ležajevima:

$$F_A = \sqrt{A_x^2 + A_z^2} = 10180.96136 \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{B_x^2 + B_z^2} = 10180.96136 \text{ N}$$

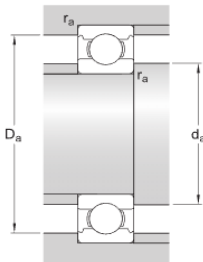
5.28 Trajnost ležajeva

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_1} \geq L_{hmin}$$



Dimensions

d	50 mm	Bore diameter
D	72 mm	Outside diameter
B	12 mm	Width
d ₁	≈ 56.8 mm	Shoulder diameter
D ₁	≈ 65.6 mm	Shoulder diameter
D ₂	≈ 67.3 mm	Recess diameter
r _{1,2}	min. 0.6 mm	Chamfer dimension



Abutment dimensions

da	min. 53.2 mm	Diameter of shaft abutment
Da	max. 68.8 mm	Diameter of housing abutment
ra	max. 0.6 mm	Radius of shaft or housing fillet

Slika 5.1 Proračun ležaja SKF za vratilo 1

$$P = F_A = F_B = 8253.806562 \text{ N}$$

$$L_{h1} = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_1} = (1,57)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 3490} = 18659.09261 \text{ h}$$

$$L_{hskf} = 65600 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_2} = (1,57)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 862,70} = 74763,205 \text{ h}$$

$$L_{hskf} = 839800 \text{ h}$$

5.29 Kontrola klinova i pera

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t_1) p_{dop}}$$

$$p_{dop} = 180 \text{ MPa}$$



$$d_{vr2}=90\text{mm}$$

b	h	t_1	t_2
20 mm	12 mm	7,5 mm	4,9 mm

$$l_2 \geq \frac{2000 \cdot 656.685}{69,06 \cdot (12 - 7,5) \cdot 180} \geq 23,50 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$l = 130 \text{ mm}$$

6. RAZMAK OSI ZUPČASTOG PARA KOD IZLAZNOG VRATILA 1

6.1 Za poznati ulazni moment T1:[Nm]

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

Za vrstu ozubljenja ravnih zubi zupčanika uzimamo iz tablice:

$$K_1 = 6840$$

$$K_2 = 320$$

6.2 Faktor širine zupčanika

$$\psi_{bd} \approx (0,1 \dots 0,3 \dots 0,5) + \frac{i_z}{20}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \left(\frac{4}{20} \right)$$

Za zupčanike sa mekim zubima (konstrukcijski čelik): $\psi_{bd} = 0,7 \leq 1,6$

Faktor primjene: $K_A = 1,5$

Faktor dodatnih dinamičkih opterećenja: $K_v = 1,1$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu: $K_{H\alpha} = 1.065$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba u zahvatu: $K_{H\beta} = 1.280$

Minimalna sigurnost na pitting: $S_{Hmin} = 1,1$

Materijal: materijal iz tablice pod tipom materijala čelici za cementaciju s termičkom obradom cementacija + kaljenje: Č4321

Trajna dinamička čvrstoća površine boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1510 \text{ Mpa}$



6.3 Razmak osi zupčastog para međuvratila 1

$$a \geq 320 \cdot (4+1) \sqrt[3]{\frac{2626.76}{0.7} \cdot \frac{4+1}{4} \cdot 1.5 \cdot 1.1 \cdot 1.1 \cdot 1.065 \left(\frac{1.1}{1510}\right)^2}$$

$$a \geq 274.688$$

Usvojeni razmak osi: $a = 280$ [mm]

6.4 Izbor modula

$$m \approx 0.1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2} = 0.1 \cdot \frac{280 \cdot 4}{(1+4)^2}$$

$$m = 4.48 \text{ mm}$$

Usvojeni razmak osi: $m = 5$ mm

Nagib zuba: $\beta = 17^\circ$

6.5 Broj zubi pogonskog zupčanika

$$z_1 = \frac{2a \cos \beta}{m(i_z+1)} = \frac{2 \cdot 280 \cos(17^\circ)}{5 \cdot (4+1)} = 21.4212$$

Broj zubi pogonskog zupčanika zaokružujemo na manji cijeli broj: $z_1 = 21$

Broj zubi gonjenog zupčanika: $z_2 = i_z \cdot z_1 = 4 \cdot 21 = 84$

Usvojeni broj zubi gonjenog zupčanika: $z_2 = 85$

Točan (računski) prijenosni omjer:

$$u = i = \frac{84}{21}$$

$$u = i = 4.047$$

Odstupanje od i_z :

$$\Delta i = \left(1 - \frac{i_z}{i}\right) = \left(1 - \frac{4}{4.047}\right)$$

$$\Delta i = 0.01176 < 0.025$$



6.6 Diobeni promjeri

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

$$d_1 = \frac{5 \cdot 21}{\cos(17^\circ)} = 109.798$$

Usvojeno:

$$d_1 = 110 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m \cdot z_2}{\cos \beta} = \frac{5 \cdot 85}{\cos(17^\circ)}$$

$$d_2 = 444.419 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_2 = 450 \text{ mm}$$

6.7 Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{(109.798 + 444.419)}{2}$$

$$a_d = 277.108 \text{ mm}$$

$$a_d < a \quad a - a_d = 2.892 < 5 \text{ mm}$$

6.8 Širina zupčanika

Širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1 = 0.7 \cdot 109.798$$

$$b = b_2 = 76.858 \text{ mm}$$

Usvojena širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = 77 \text{ mm}$$

$$b_1 = b + 5 = 77 + 5$$

$$b_1 = 82 \text{ mm}$$



6.9 Stupanj prekrivanja koraka

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{b \sin \beta}{\pi m_n} = \frac{82 \cdot \sin(17^\circ)}{\pi \cdot 5}$$

$$\varepsilon_{\beta} = 1.526262786$$

Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku: $\alpha_n = 20^\circ$

Za ravne zube: $\alpha_t = \alpha_n = 20.837^\circ$

6.10 Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos \alpha_t\right) = \arccos\left(\frac{174,107}{178} \cos(20^\circ)\right)$$

$$\alpha_{wt} = 22.34006171^\circ$$

6.11 Suma faktora pomaka profila

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

$$\operatorname{inv} \alpha_{wt} = \tan \alpha_{wt} - \frac{\pi \alpha_{wt}}{180} = \tan(22.34006171^\circ) - \frac{\pi \cdot 22.34006171}{180} = 0.02103931218$$

$$\operatorname{inv} \alpha_t = \tan \alpha_t - \frac{\pi \alpha_t}{180} = \tan(20^\circ) - \frac{\pi \cdot 20}{180} = 0.01692924539$$

$$x_1 + x_2 = \frac{0.02103931218 - 0.01692924539}{2 \tan(20^\circ)} \cdot (21 + 85) = 1.391 < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0.5984927$$

6.12 Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG

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

$$x_1 = \frac{0.5984927}{2} + \frac{[1 - (0.5984927)] \ln 4}{2 \ln \left(\frac{21 \cdot 85}{100}\right)}$$

$$x_1 = 0.387689716$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1 = 0.5984927 - 0.387689716$$



$$x_2 = 0.2108030$$

6.13 Ekvivalentni brojevi zubi

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} = \frac{21}{\cos^2(0,005) \cdot \cos(17^\circ)} = 24.0509$$

$$Z_{n1} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} = \frac{85}{\cos^2(0,005) \cdot \cos(17^\circ)} = 99.34$$

6.14 Promjer preko korijena zuba

$$d_{f1} = m \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2x_1 - 2,5 \right) = 5 \left(\frac{21}{\cos(17^\circ)} + 2 \cdot 0.387689716 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 101.188 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2x_2 - 2,5 \right) = 5 \left(\frac{85}{\cos(17^\circ)} + 2 \cdot 0.2108030 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 434.016 \text{ mm}$$

6.15 Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2} - 0,5mn$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 280 - 434.016 - 0,5 \cdot 5 = 123.473$$

Usvojeno:

$$d_{a1} = 123.500 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1} - 0,5mn$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 280 - 101.188 - 0,5 \cdot 5 = 456.325$$

Usvojeno:

$$d_{a2} = 456.500 \text{ mm}$$



6.16 Promjer temeljnih krugova

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

$$d_{b1} = 109.798 \cdot \cos (20.837^\circ)$$

$$d_{b1} = 102.617$$

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

$$d_{b2} = 444.419 \cdot \cos (20.837^\circ)$$

$$d_{b2} = 415.353 \text{ mm}$$

6.17 Promjeri pogonskih krugova

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

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 280}{4+1}$$

$$d_{w1} = 110.943 \text{ mm}$$

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

$$d_{w2} = 2 \cdot 280 - 110.943$$

$$d_{w2} = 449.057 \text{ mm}$$

6.18 Stupanj prekrivanja profila

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{5}{\cos(17^\circ)}$$

$$m_t = 5.228$$

6.19 Kosi zubi

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



$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{123.500^2 - 102.617^2} + \sqrt{456.325^2 - 415.353^2} - 2 \cdot 280 \cdot \sin(22.34006171^\circ)}{2\pi \cdot 5 \cdot \cos(20.837^\circ)}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1.589 \geq 1,1$$

6.20 Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

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

$$S_{an1} = 123.500 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0.387689716 \cdot \tan(20^\circ)}{2 \cdot 21} + 0.01692924539 - 0.0758328289109215 \right) \cdot \cos(19.086^\circ)$$

$$S_{an1} = 3.497006301 \text{ mm}$$

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

$$\alpha_{at1} = \arccos \left(\frac{102.617}{123.473} \right) = 33.32^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right) = \arctan \left(\frac{123.500}{109.798} \tan(17^\circ) \right) = 18.97^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180} = \tan(33.32^\circ) - \frac{\pi \cdot 33.32^\circ}{180} = 0.0758328289109215$$

6.21 Relativna debljina vrhi zuba

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

$$S_{an2} = 456.500 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0.2108030 \cdot \tan(20^\circ)}{2 \cdot 85} + 33.32 - 0.025560908 \right) \cdot \cos \beta_{a2}$$

$$S_{an2} = 5.073714092 \text{ mm}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \left(\frac{415.353}{456.500} \right) = 23.77^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right) = \arctan \left(\frac{456.500}{444.419} \cdot \tan(17^\circ) \right) = 17.43^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180} = \tan(23.77^\circ) - \frac{\pi \cdot 23.77^\circ}{180} = 0.025560908$$



7. KONTROLNI PRORAČUN IZLAZNOG VRATILA 1

7.1 Nosivost boka zuba

Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{bd_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Faktor modula elastičnosti za čelik iznosi:

$$Z_E = 189.72 \sqrt{\text{MPa}}$$

7.2 Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20^\circ)} \sqrt{\frac{2 \cos(0,005^\circ)}{\tan(23.914^\circ)}}$$

$$Z_H = 2.31$$

7.3 Faktor nagiba zuba

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

$$Z_\beta = 0.98$$

7.4 Faktor utjecaja prekrivanja za zupčanike sa ravnim zubima

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{4 - \epsilon_\alpha}{3}} = \sqrt{\frac{4 - 1.589}{3}}$$

$$Z_\epsilon = 0,82$$



7.5 Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000T_1}{d_1}$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 2626.76}{109.798}$$

$$F_t = 47846.94N$$

Faktor primjene: $K_A = 1,5$

7.6 Obodna brzina zupčanika

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{109.798 \cdot 872.5}{19100}$$

$$v_1 = 5.016 \frac{m}{s} < 14$$

Kvaliteta ozubljenja dobiveno iz tablice: $Q = 8$ (*fino glodano*)

Obrada: dobiveno iz tablice - brušeno

Hrapavost boka zuba (dobiveno iz tablice):

$$R_z = 3 \mu m$$

$$K_v = K_{v\alpha} = 1 + 1,8Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 1,8 \cdot 8^2 \cdot 5.016 \cdot 21 \cdot 10^{-5}$$

$$K_v = K_{v\alpha} = 1.038$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu: $K_{H\alpha} = 1.040$

7.7 Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left(\frac{b}{d_1} \right)^2 + 0,0005b = 1,17 + 0,18 \left(\frac{86}{109.798} \right)^2 + 0,0005 \cdot 86$$

$$K_{H\beta} = 1.204$$

$$\sigma_H = 1049.40 \text{ MPa}$$



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

Minimalna sigurnost na pitting uzeta iz tablice materijala: $\sigma_{Hlim} = 1510 MPa$

Hydroelastično – tribomehanički faktor: $Z_{LVR} = 1.01$

Faktor povećanja tvrdoće: $Z_W = 1.00$

7.8 Faktor utjecaja veličine očitane iz tablice

$$Z_X = 1.00$$

$$S_H = \frac{1510}{1049.40} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_H = 1.45 > 1.1 S_{Hmin}$$

Naprezanje na savijanje:

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

7.9 Fiktivni broj zuba

$$z_{n1} = 24.49$$

$$z_{n2} = 97.19$$

7.10 Faktor zahvata na vrhu zuba

$$Y_{FS1} = 4.08 + 0.18 \cdot x1^2 + \frac{7.63}{24.49} - 15.94 \cdot \frac{x1}{24.49}$$

$$Y_{FS1} = 4.08 + 0.18 \cdot 0.387689716^2 + \frac{7.63}{24.49} - 15.94 \cdot \frac{0.387689716}{24.49}$$

$$Y_{FS1} = 4.166$$

$$Y_{FS2} = 4.08 + 0.18 \cdot x2^2 + \frac{7.63}{97.19} - 15.94 \cdot \frac{x2}{97.19}$$



$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,2108030^2 + \frac{7,63}{100} - 15,94 \cdot \frac{0,2108030}{100}$$

$$Y_{FS2} = 4.132$$

7.11 Faktor kuta nagiba

$$Y_{\beta} = 1 - \frac{\epsilon_{\beta} \cdot \beta}{120} = 1 - \frac{1.526262786 \cdot 17^{\circ}}{120} = 0.783779439$$

7.12 Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\epsilon} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\epsilon_{\alpha}} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2(17^{\circ})}{1.589}$$

$$Y_{\epsilon} = 0.681666168$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu: $K_{F\alpha} = 1.1$

7.13 Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\alpha}^{0,9} = 1.040^{0,9} = 1.173$$

$$\sigma_{F1} = \frac{47846.94}{21 \cdot 5} \cdot 4.166 \cdot 0.86 \cdot 0.79 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1.040 \cdot 1.240$$

$$\sigma_{F1} = 560.730 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{F2} = \frac{47846.94}{86 \cdot 5} \cdot 4.132 \cdot 0.86 \cdot 0.79 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1.040 \cdot 1.240$$

$$\sigma_{F2} = 596.800 \text{ Mpa}$$

7.14 Sigurnost protiv loma

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

$$S_F = 2.47$$



$$S_{Fmin} = 1.6 \dots 3$$

Reduktori su visoke pouzdanosti čiji lom može izazvati veće materijalne štete, a rezervni dijelovi su teško dobavljivi.

Dinamička čvrstoća korijena zuba iz tablice materijala: $\sigma_{FE} = 920$ Mpa

Faktor osjetljivosti materijala na koncentratore naprezanja: $Y_\delta = 1$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba: $Y_R = 1$

7.15 Faktor veličine zupčanika

$$Y_X = 1$$

$$S_{F1} = \frac{920}{560.730} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_{F1} = 2.47 \geq 1.1$$

$$S_{F2} = \frac{920}{596.800} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_{F2} = 2.29 \geq 1.1$$

7.16 Bočna zračnost zuba

$$A_{sne1} = -170 \mu\text{m}$$

$$A_{sne2} = -130 \mu\text{m}$$

$$T_{sn1} = 100 \mu\text{m}$$

$$T_{sn2} = 160 \mu\text{m}$$

$$A_{sni1} = A_{sne1} - T_{sn1} = -170 \mu\text{m}$$

$$A_{sni2} = A_{sne2} - T_{sn2} = -290 \mu\text{m}$$

$$A_{ae} = 26 \mu\text{m}$$

$$A_{ai} = -26 \mu\text{m}$$



$$j_{nmin} = -(A_{sne1} + A_{sne2}) \cos \alpha_n + 2A_{ai} \sin \alpha_n$$

$$j_{nmin} = -(-170 + (-130)) \cos(20^\circ) + 2 \cdot (-20) \sin(20^\circ)$$

$$j_{nmin} = 170 \mu\text{m}$$

$$j_{nmax} = -(A_{sni1} + A_{sni2}) \cos \alpha_n + 2A_{ae} \sin \alpha_n$$

$$j_{nmax} = -(-170 + (-290)) \cos(20^\circ) + 2 \cdot 20 \sin(20^\circ)$$

$$j_{nmax} = 450 \mu\text{m}$$

7.17 Tetivna mjera debljine zubi

$$k_1 = 3$$

$$k_2 = 10$$

$$W_k = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k - \frac{z}{2|z|} \right) \pi + z \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot x \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k1} = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k_1 - \frac{z_1}{2|z_1|} \right) \pi + z_1 \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot x_1 \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k1} = 5 \cdot \cos(20^\circ) \left[\left(3 - \frac{21}{2|21|} \right) \pi + 22 \cdot 0,34906585 \right] + 2 \cdot 0,387689716 \cdot 5 \cdot \sin(20^\circ)$$

$$W_{k1} = 46,190 \text{ mm}$$

$$W_{k2} = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k_2 - \frac{z_2}{2|z_2|} \right) \pi + z_2 \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot x_2 \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k2} = 5 \cdot \cos(20^\circ) \left[\left(10 - \frac{86}{2|86|} \right) \pi + 88 \cdot 0,34906585 \right] + 2 \cdot 0,2108030 \cdot 5 \cdot \sin(20^\circ)$$

$$W_{k2} = 181,332 \text{ mm}$$

$$A_{we} = 0,94 \cdot A_{sne}$$

$$A_{wi} = 0,94 \cdot A_{sni}$$

$$A_{we1} = 0,94 \cdot A_{sne1} = 0,94 \cdot (-70) = -65,8 \mu\text{m}$$



$$A_{we2} = 0,94 \cdot A_{sne2} = 0,94 \cdot (-130) = -122,2 \mu\text{m}$$

$$A_{wi1} = 0,94 \cdot A_{sni1} = 0,94 \cdot (-170) = -159,8 \mu\text{m}$$

$$A_{wi2} = 0,94 \cdot A_{sni2} = 0,94 \cdot (-290) = -272,6 \mu\text{m}$$

7.18 Izbor ulja za podmazivanje

Obodna brzina na diobenom krugu:

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{109.798 \cdot 872.50}{19100} = 5.015 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

7.19 Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1}$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 2626.740}{109.798}$$

$$F_t = 47846.94 \text{ N}$$

7.20 Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3 F_t}{b d_1} \frac{i+1}{i} = \frac{3 \cdot 47846.94}{86 \cdot 109.798} \cdot \frac{4+1}{4} = 19.882 \text{ Mpa}$$

7.21 Potrebna viskoznost ulja

$$v_{40} = 208 \left(\frac{k_s}{v} \right)^{0,418} = 208 \left(\frac{19.881}{5.015} \right)^{0,418} = 369.899 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

ulje- MOBILGEAR 632



7.22 Izbor i kontrola trajnosti ležajeva

Minimalni promjer pogonskog vratila:

$$d_{vr1} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{tdop}}}$$

$$T_1 = \frac{P^1}{\omega_1} = \frac{240 \cdot 10^3}{365,472} = 2626.740 \text{ Nm}$$

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 872.50}{30} = 91.367$$

$$R_{dt-1} = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{tdop} = \frac{R_{dt-1}}{10 \dots 12} = \frac{300}{10} = 27.2727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{vr1} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 2626.740}{\pi \cdot 27,27}}$$

$$d_{vr1} \geq 78.86 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_{vr1} = 80 \text{ mm}$$

7.23 Minimalni promjer gonjenog vratila

$$d_{vr2} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 T_2}{\pi \tau_{tdop}}}$$

$$T_2 = T_1 i = 2626.740 \cdot 4 = 10632.040 \text{ Nm}$$

$$d_{vr2} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 10632.040}{\pi \cdot 27,27}}$$

$$d_{vr2} \geq 89.003$$



Usvojeno:

$$d_{vr2} = 90 \text{ mm}$$

7.24 Sile na ozubljenju

$$F_{bn} = F_{bn1} = F_{bn2} = \frac{F_t}{\cos\alpha_{wt}} = \frac{47847.296}{\cos(20.837^\circ)} = 50915.200 \text{ N}$$

7.25 Obodna sila

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot T_1}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 2626.740}{110.943 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_{wt} = 47353.156 \text{ N}$$

7.26 Radijalna sila

$$F_r = F_{r1} = F_{r2} = F_{wt} \cdot \tan\alpha_w$$

$$F_r = 19459.384 \text{ N}$$

7.27 Aksijalna sila

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan\beta_w = 14628.28 \text{ N}$$

$$\tan\beta_w = \frac{a}{a_d} \tan\beta = 0.308921046$$

Reakcije u ležajevima:

$$A_z = \frac{F_r}{2} = 9729.817 \text{ N}$$

$$B_z = \frac{F_r}{2} = 9729.817 \text{ N}$$

$$A_x = \frac{F_{wt}}{2} = \frac{47353.156}{2} = 23676.578 \text{ N}$$

$$B_x = \frac{F_{wt}}{2} = \frac{47353.156}{2} = 23676.578 \text{ N}$$

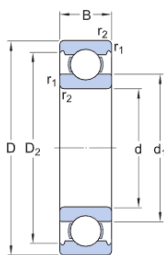
Ukupne reakcije u ležajevima:

$$F_A = \sqrt{A_x^2 + A_z^2} = 25597.845 \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{B_x^2 + B_z^2} = 25597.845 \text{ N}$$

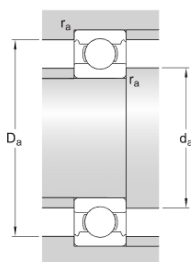
7.28 Trajnost ležajeva

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_1} \geq L_{hmin}$$



Dimensions

d	75 mm	Bore diameter
D	105 mm	Outside diameter
B	16 mm	Width
d ₁	≈ 84.8 mm	Shoulder diameter
D ₂	≈ 97.9 mm	Recess diameter
r _{1,2}	min. 1.9 mm	Chamfer dimension



Abutment dimensions

d _a	min. 79.6 mm	Diameter of shaft abutment
D _a	max. 100 mm	Diameter of housing abutment
r _a	max. 1 mm	Radius of shaft or housing fillet

Slika 7.1 Proračun ležaja SKF za vratilo 2

$$P = F_A = F_B = 25597.845 \text{ N}$$

$$L_{h1} = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_1} = (1,23)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 872.50} = 23559.163 \text{ h}$$

$$L_{hskf} = 65600 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_2} = (1,57)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 215.56} = 89288,163 \text{ h}$$



$$L_{hskf} = 89300 \text{ h}$$

7.29 Kontrola klinova i pera

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t_1)p_{dop}}$$

$$p_{dop} = 180 \text{ MPa}$$

$$d_{vr2} = 90 \text{ mm}$$

b	h	t_1	t_2
20 mm	12 mm	7,5 mm	4,9 mm

$$l_2 \geq \frac{2000 \cdot 4719.4}{89.00329914 \cdot (12 - 7,5) \cdot 180} \geq 129.476 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$l = 130 \text{ mm}$$



8. RAZMAK OSI ZUPČASTOG PARA MEĐUVRATILA 3-4:

Za poznati ulazni moment T_1 : [Nm]

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

Za vrstu ozubljenja ravnih zubi zupčanika uzimamo iz tablice :

$$K_1 = 6840$$

$$K_2 = 320$$

Faktor širine zupčanika:

$$\psi_{bd} \approx (0,1 \dots 0,3 \dots 0,5) + \frac{i_z}{20}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \left(\frac{5,83}{20} \right)$$

Za zupčanike sa mekim zubima (konstrukcijski čelik):

$$\psi_{bd} = 0,7915 \leq 1,6$$

Faktor primjene : $K_A = 1$

Faktor dodatnih dinamičkih opterećenja: $K_v = 1,1$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu: $K_{H\alpha} = 1$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba u zahvatu: $K_{H\beta} = 1,12$

Minimalna sigurnost na pitting: $S_{Hmin} = 1,1$

Materijal: materijal iz tablice pod tipom materijala čelici za cementaciju s termičkom obradom cementacija + kaljenje: Č4321

Trajna dinamička čvrstoća površine boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1480 \text{ Mpa}$



8.1 Razmak osi zupčastog para međuvratila 1

$$a \geq 320 \cdot (5.83+1) \sqrt[3]{\frac{766.133}{0.7} \cdot \frac{5.83+1}{5.83} \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \left(\frac{1,1}{1480}\right)^2}$$

$$a \geq 233.747 \text{ mm}$$

Usvojeni razmak osi: $a = 238$ [mm]

8.2 Izbor modula

$$m \approx 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1 + i_z)^2} = 0,1 \cdot \frac{238 \cdot 5,83}{(1 + 5,83)^2}$$

$$m = 2.974432409 \text{ mm}$$

Usvojeni razmak osi: $m = 3$ mm

Nagib zuba: $\beta = 17^\circ$

8.3 Broj zubi pogonskog zupčanika

$$z_1 = \frac{2a \cos \beta}{m(i_z+1)} = \frac{2 \cdot 238 \cos(17^\circ)}{3 \cdot (5,83+1)} = 22.2158$$

Broj zubi pogonskog zupčanika : $z_1 = 21$

8.4 Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = i_z \cdot z_1 = 5,83 \cdot 21 = 88,00$$

Usvojeni broj zubi gonjenog zupčanika: $z_2 = 128.2600$

Broj zuba zaokružujemo na veći cijeli broj: $z_2 = 129$

8.5 Točan (računski) prijenosni omjer

$$u = i = \frac{129}{21}$$

$$u = i = 5.86364$$



Odstupanje od i_z :

$$\Delta i = \left(1 - \frac{i_z}{i}\right) = \left(1 - \frac{5,83}{5.86364}\right)$$

$$\Delta i = 0.00574 < 0,025$$

8.6 Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{3 \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{3 \cdot 21}{\cos(17^\circ)} = 69.0156$$

Usvojeno:

$$d_1 = 70 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m \cdot z_2}{\cos \beta} = \frac{5 \cdot 129}{\cos(17^\circ)}$$

$$d_2 = 404.682 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_2 = 405 \text{ mm}$$

8.7 Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{(69.0156 + 404.682)}{2}$$

$$a_d = 236.849 \text{ mm}$$

$$a_d < a \quad a - a_d = 1.151 < 5 \text{ mm}$$

8.8 Širina zupčanika

Širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1 = 0.7 \cdot 69.016$$

$$b = b_2 = 54.63 \text{ mm}$$



Usvojena širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = 55 \text{ mm}$$

$$b_1 = b + 5 = 55 + 5 = 60 \text{ mm}$$

$$b_1 = 60 \text{ mm}$$

8.9 Stupanj prekrivanja koraka

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi m_n} = \frac{55 \cdot 0.292371705}{\pi \cdot 3}$$

$$\varepsilon_\beta = 1.706188074$$

Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku: $\alpha_n = 20^\circ$

Za ravne zube: $\alpha_t = \alpha_n = 20.837^\circ$

8.10 Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos \alpha_t\right) = \arccos\left(\frac{236.849}{238} \cos(20^\circ)\right)$$

$$\alpha_{wt} = 21.553^\circ$$

8.11 Suma faktora pomaka profila

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

$$\text{inv} \alpha_{wt} = \tan \alpha_{wt} - \frac{\pi \alpha_{wt}}{180} = \tan(21.553^\circ) - \frac{\pi \cdot 21.553}{180} = 0.01880907466$$

$$\text{inv} \alpha_t = \tan \alpha_t - \frac{\pi \alpha_t}{180} = \tan(20^\circ) - \frac{\pi \cdot 20^\circ}{180} = 0.01692924539$$

$$x_1 + x_2 = \frac{0.01880907466 - 0.01692924539}{2 \tan 20^\circ} \cdot (21 + 129) = 0.3899415 < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0.3899415$$



8.12 Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG

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

$$x_1 = \frac{0.3899415}{2} + \frac{[1 - (0.364977997 + 0.0249635)] \ln 4}{2 \ln \left(\frac{21 \cdot 129}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0.364977997$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1 = 0.3899415 - 0.364977997$$

$$x_2 = 0.0249635$$

8.13 Ekvivalentni brojevi zubi

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} = \frac{21}{\cos^2(0,005) \cdot \cos(17^\circ)} = 24.0509$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} = \frac{129}{\cos^2(0,005) \cdot \cos(17^\circ)} = 99.34$$

8.14 Promjer preko korijena zuba

$$d_{f1} = m \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2x_1 - 2,5 \right) = 3 \left(\frac{21}{\cos(17^\circ)} + 2 \cdot 0.364977997 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 63.706 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2x_2 - 2,5 \right) = 3 \left(\frac{129}{\cos(17^\circ)} + 2 \cdot 0.0249635 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 397.332 \text{ mm}$$

8.15 Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f1} - 0,5 \text{ mn}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 238 - 63.706 - 0,5 \cdot 3 = 77.168$$

Usvojeno:

$$d_{a1} = 78.500 \text{ mm}$$



$$d_{a2} = 2a - d_{f1} - 0,5mn$$

$$d_{a2} = 410.794 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_{a2} = 411.000 \text{ mm}$$

8.16 Promjer temeljnih krugova

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

$$d_{b1} = 69.016 \cdot \cos (20.837^\circ)$$

$$d_{b1} = 64.854$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t = 404.683 \cdot \cos (20.837^\circ)$$

$$d_{b2} = 378.215 \text{ mm}$$

8.17 Promjeri pogonskih krugova

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

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 238}{5,83 + 1}$$

$$d_{w1} = 69.351 \text{ mm}$$

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

$$d_{w2} = 2 \cdot 238 - 69.351$$

$$d_{w2} = 406.649 \text{ mm}$$

8.18 Stupanj prekrivanja profila

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{3}{\cos(17^\circ)}$$

$$m_t = 3.137 \text{ mm}$$

8.19 Kosi zubi

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

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{77.168^2 - 64.854^2} + \sqrt{411.000^2 - 378.215^2} - 2 \cdot 238 \cdot \sin(21.553^\circ)}{2\pi \cdot 3 \cdot \cos(20.837^\circ)}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1.881 \geq 1,1$$

8.20 Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

$$S_{an1} = d_{a1} \left(\frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2Z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

$$S_{an1} = 78.168 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0.364977997 \cdot \tan(20^\circ)}{2 \cdot 21} + 0.0169 - 0.0800 \right) \cdot \cos(18.872^\circ) = 2.107 \text{ mm} > 0,4$$

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

$$\alpha_{at1} = \arccos \left(\frac{64.502}{78.500} \right) = 32.8149^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right) = \arctan \left(\frac{78.500}{69.016} \tan(17^\circ) \right) = 18.872^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180} = \tan(32.8149^\circ) - \frac{\pi \cdot 32.8149^\circ}{180} = 0.0721$$

8.21 Relativna debljina vrhi zuba

$$S_{an2} = d_{a2} \cdot \left(\frac{\pi + 4x_2 \tan \alpha_n}{2Z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$

$$S_{an2} = 411.000 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0.0249635 \cdot \tan(20^\circ)}{2 \cdot 129} + 0.07209 - 0.02069 \right) \cdot \cos \beta_{a2}$$

$$S_{an2} = 3.353 \text{ mm} > 0,4$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \left(\frac{378.215}{411.000} \right) = 22.224^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right) = \arctan \left(\frac{411.000}{404.683} \cdot \tan(17^\circ) \right) = 17.242^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180} = \tan(22.224^\circ) - \frac{\pi \cdot 22.224^\circ}{180} = 0.020699315$$



9. KONTROLNI PRORAČUN ZUPČASTOG PARA 3-4

9.1 Nosivost boka zuba

Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{bd_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Faktor modula elastičnosti za čelik iznosi: $Z_E = 190 \sqrt{\text{MPa}}$

9.2 Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20)} \sqrt{\frac{2 \cos(0,005^\circ)}{\tan(21,553^\circ)}}$$

$$Z_H = 2,36$$

9.3 Faktor nagiba zuba

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

$$Z_\beta = 0,98$$

9.4 Faktor utjecaja prekrivanja za zupčanike sa ravnim zubima

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{4 - \epsilon_\alpha}{3}} = \sqrt{\frac{4 - 1,696}{3}}$$

$$Z_\epsilon = 0,84$$

9.5 Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1}$$



$$F_t = \frac{2000 \cdot 766.133}{69.016}$$

$$F_t = 22201.71 N$$

Faktor primjene: $K_A = 1,1$

9.6 Obodna brzina zupčanika

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{69.016 \cdot 3490.00}{19100}$$

$$v_1 = 12.61 \frac{m}{s} < 14$$

Kvaliteta ozubljenja dobiveno iz tablice: $Q = 6$ (*brušeno*)

Obrada: brušeno (dobiveno iz tablice)

Hrapavost boka zuba (dobiveno iz tablice):

$$R_z = 3 \mu m$$

$$K_v = K_{v\alpha} = 1 + 1,8 Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 1,8 \cdot 6^2 \cdot 12.61 \cdot 21 \cdot 10^{-5}$$

$$K_v = K_{v\alpha} = 1.119$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu: $K_{H\alpha} = 1.1$

9.7 Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left(\frac{b}{d_1} \right)^2 + 0,0005 b = 1,17 + 0,18 \left(\frac{60}{69,016} \right)^2 + 0,0005 \cdot 60$$

$$K_{H\beta} = 1.303$$

$$\sigma_H = 1316.966 MPa$$

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

Minimalna sigurnost na pitting uzeta iz tablice materijala: $\sigma_{Hlim} = 1480 MPa$



Hydroelastično – tribomehanički faktor: $Z_{LVR} = 1.01$

Faktor povećanja tvrdoće: $Z_W = 1.00$

9.8 Faktor utjecaja veličine očitane iz tablice

$$Z_X = 1.00$$

$$S_H = \frac{1480}{1316.966} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_H = 1.146 > 1.1 S_{Hmin}$$

9.9 Nosivost korijena zuba

Naprezanje na savijanje:

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

Fiktivni broj zuba:

$$z_{n1} = 25.40$$

$$z_{n2} = 147.503$$

9.10 Faktor zahvata na vrhu zuba

$$Y_{FS1} = 4.08 + 0.18 \cdot x1^2 + \frac{7.63}{Z_{n1}} - 15.94 \cdot \frac{x1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4.08 + 0.18 \cdot 0.364977997^2 + \frac{7.63}{25.40} - 15.94 \cdot \frac{0.364977997}{25.40}$$

$$Y_{FS1} = 4.175$$

$$Y_{FS2} = 4.08 + 0.18 \cdot x2^2 + \frac{7.63}{Z_{n2}} - 15.94 \cdot \frac{x2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4.08 + 0.18 \cdot 0.0249635^2 + \frac{7.63}{147.503} - 15.94 \cdot \frac{0.0249635}{147.503}$$



$$Y_{FS2} = 4.129$$

9.11 Faktor kuta nagiba

$$Y_{\beta} = 1 - \frac{\varepsilon_{\beta} \cdot \beta}{120} = 1 - \frac{1.706 \cdot 17^{\circ}}{120} = 0.86$$

9.12 Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\varepsilon} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_{\alpha}} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2(17^{\circ})}{1.522}$$

$$Y_{\varepsilon} = 0.74$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu: $K_{F\alpha} = 1.090$

9.13 Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\alpha}^{0,9} = 1.090^{0,9} = 1.265$$

$$\sigma_{F1} = \frac{22201.71}{60 \cdot 3} \cdot 4.175 \cdot 0.86 \cdot 0.74 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1.090 \cdot 1.265$$

$$\sigma_{F1} = 506.71 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{F2} = \frac{22201.71}{60 \cdot 3} \cdot 4.129 \cdot 0.86 \cdot 0.74 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1.090 \cdot 1.265$$

$$\sigma_{F2} = 557.67 \text{ Mpa}$$

9.14 Sigurnost protiv loma

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

$$S_F = 1.75$$



$$S_{Fmin} = 1.6 \dots 3$$

Reduktori su visoke pouzdanosti čiji lom može izazvati veće materijalne štete; teško su dobavljivi rezervni dijelovi.

Dinamička čvrstoća korijena zuba iz tablice materijala: $\sigma_{FE} = 860$ Mpa

Faktor osjetljivosti materijala na koncentratore naprezanja: $Y_\delta = 1$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba: $Y_R = 1$

9.15 Faktor veličine zupčanika

$$Y_X = 1$$

$$S_{F1} = \frac{860}{506.71} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_{F1} = 1.75 \geq 1.1$$

$$S_{F2} = \frac{860}{557.67} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_{F2} = 1.60 \geq 1.1$$

9.16 Bočna zračnost zuba

$$A_{sne1} = -70 \mu\text{m}$$

$$A_{sne2} = -130 \mu\text{m}$$

$$T_{sn1} = 100 \mu\text{m}$$

$$T_{sn2} = 1160 \mu\text{m}$$

$$A_{sni1} = A_{sne1} - T_{sn1} = -170 \mu\text{m}$$

$$A_{sni2} = A_{sne2} - T_{sn2} = -290 \mu\text{m}$$

$$A_{ae} = 23 \mu\text{m}$$

$$A_{ai} = -23 \mu\text{m}$$



$$j_{nmin} = -(A_{sne1} + A_{sne2}) \cos \alpha_n + 2A_{ai} \sin \alpha_n$$

$$j_{nmin} = -(-170 + (-130)) \cos(20^\circ) + 2 \cdot (-23) \sin(20^\circ)$$

$$j_{nmin} = 172 \mu\text{m}$$

$$j_{nmax} = -(A_{sni1} + A_{sni2}) \cos \alpha_n + 2A_{ae} \sin \alpha_n$$

$$j_{nmax} = -(-170 + (-290)) \cos(20^\circ) + 2 \cdot 20 \sin(23^\circ)$$

$$j_{nmax} = 192 \mu\text{m}$$

9.17 Tetivna mjera debljine zubi

$$k_1 = 3$$

$$k_2 = 12$$

$$W_k = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k - \frac{z}{2|z|} \right) \pi + z \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot x \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k1} = 3 \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k_1 - \frac{21}{2|21|} \right) \pi + 21 \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot 0.364977997 \cdot 3 \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k1} = 3 \cdot \cos(20^\circ) \left[\left(3 - \frac{21}{2|21|} \right) \pi + 21 \cdot 0.592539281 \right] + 2 \cdot 0.364977997 \cdot 3 \cdot \sin(20^\circ)$$

$$W_{k1} = 27.648 \text{ mm}$$

$$W_{k2} = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k_2 - \frac{z_2}{2|z_2|} \right) \pi + z_2 \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2x_2 \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k2} = 3 \cdot \cos(20^\circ) \left[\left(12 - \frac{129}{2|129|} \right) \pi + 129 \cdot 0.592539281 \right] + 2 \cdot 0.7815653 \cdot 3 \cdot \sin(20^\circ)$$

$$W_{k2} = 109.910 \text{ mm}$$

$$A_{we} = 0,94 \cdot A_{sne}$$

$$A_{wi} = 0,94 \cdot A_{sni}$$

$$A_{we1} = 0,94 \cdot A_{sne1} = 0,94 \cdot (-170) = -65,8 \mu\text{m}$$



$$A_{we2} = 0,94 \cdot A_{sne2} = 0,94 \cdot (-130) = -122,2 \mu\text{m}$$

$$A_{wi1} = 0,94 \cdot A_{sni1} = 0,94 \cdot (-170) = -159,8 \mu\text{m}$$

$$A_{wi2} = 0,94 \cdot A_{sni2} = 0,94 \cdot (-290) = -272,6 \mu\text{m}$$

9.18 Izbor ulja za podmazivanje

Obodna brzina na diobenom krugu:

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{69.016 \cdot 3490}{19100} = 12.611 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

9.19 Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1}$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 766.133}{69,06}$$

$$F_t = 22201.71 \text{ N}$$

9.20 Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3 F_t i^{i+1}}{b d_1 i} = \frac{3 \cdot 22201.71 \cdot 5.83^{i+1}}{60 \cdot 69,06 \cdot 5.83} = 20.539 \text{ Mpa}$$

9.21 Potrebna viskoznost ulja

$$v_{40} = 208 \left(\frac{k_s}{v} \right)^{0,418} = 208 \left(\frac{20.539}{12.611} \right)^{0,418} = 255.043 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

ulje- MOBILGEAR 632

9.22 Izbor i kontrola trajnosti ležajeva

Minimalni promjer pogonskog vratila:



$$d_{vr1} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{tdop}}}$$

$$T_1 = \frac{P^1}{\omega_1} = \frac{280 \cdot 10^3}{365,472} = 766.133 \text{ Nm}$$

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 3490}{30} = 365,472$$

$$R_{dt-1} = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{tdop} = \frac{R_{dt-1}}{10 \dots 12} = \frac{300}{10} = 27,2727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{vr1} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 766.133}{\pi \cdot 27,27}}$$

$$d_{vr1} \geq 52.301 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_{vr1} = 52 \text{ mm}$$

9.23 Minimalni promjer gonjenog vratila

$$d_{vr2} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 T_2}{\pi \tau_{tdop}}}$$

$$T_2 = T_1 i = 766.133 \cdot 5,83 = 4492.323 \text{ Nm}$$

$$d_{vr2} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 4492.323}{\pi \cdot 27,27}}$$

$$d_{vr2} \geq 89.003$$

Usvojeno:



$$d_{vr2} = 90 \text{ mm}$$

9.24 Sile na ozubljenju

$$F_{bn} = F_{bn1} = F_{bn2} = \frac{F_t}{\cos \alpha_{wt}} = \frac{22201.71}{\cos(21.553^\circ)} = -24515.62492 \text{ N}$$

9.25 Obodna sila

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot T_1}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 766.133}{69.351 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_{wt} = 22094.276 \text{ N}$$

9.26 Radijalna sila

$$F_r = F_{r1} = F_{r2} = F_{wt} \cdot \tan \alpha_w$$

$$F_r = 8726.860 \text{ N}$$

9.27 Aksijalna sila

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w = 6787.719 \text{ N}$$

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \tan \beta = 0.30721$$

Reakcije u ležajevima:

$$A_z = \frac{F_r}{2} = 4363.430 \text{ N}$$

$$B_z = \frac{F_r}{2} = 4363.430 \text{ N}$$

$$A_x = \frac{F_{wt}}{2} = \frac{22094.276}{2} = 11047.138 \text{ N}$$

$$B_x = \frac{F_{wt}}{2} = \frac{22094.276}{2} = 11047.138 \text{ N}$$

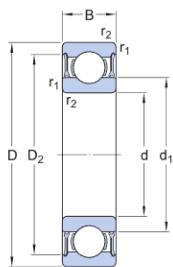
Ukupne reakcije u ležajevima:

$$F_A = \sqrt{A_x^2 + A_z^2} = 11877.659 \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{B_x^2 + B_z^2} = 11877.659 \text{ N}$$

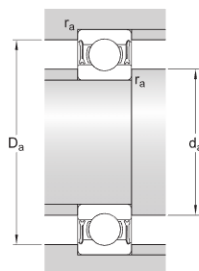
9.28 Trajnost ležajeva

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_1} \geq L_{hmin}$$



Dimensions

d	100 mm	Bore diameter
D	125 mm	Outside diameter
B	13 mm	Width
d ₁	≈ 108.3 mm	Shoulder diameter
D ₂	≈ 119.3 mm	Recess diameter
r _{1,2}	min. 1 mm	Chamfer dimension



Abutment dimensions

d _a	min. 105 mm	Diameter of shaft abutment
d _a	max. 107.9 mm	Diameter of shaft abutment
D _a	max. 120 mm	Diameter of housing abutment
r _a	max. 1 mm	Radius of shaft or housing fillet

Slika 9.1 Proračun ležaja SKF za vratilo 3

$$P = F_A = F_B = 11877.659 \text{ N}$$

$$L_{h1} = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_1} = (1,57)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 3490} = 15786.259 \text{ h}$$

$$L_{hskf} = 65600 \text{ h}$$

$$L_{h2} = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_2} = (1,57)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 862,70} = 24738.879 \text{ h}$$



$$L_{hskf} = 839800 \text{ h}$$

9.29 Kontrola klinova i pera

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t_1)p_{dop}}$$

$$p_{dop} = 180 \text{ MPa}$$

$$d_{vr2} = 90 \text{ mm}$$

b	h	t_1	t_2
20 mm	12 mm	7,5 mm	4,9 mm

$$l_2 \geq \frac{2000 \cdot 766.133}{89.00329914 \cdot (12-7,5) \cdot 180} \geq 129.476 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$l = 130 \text{ mm}$$



10. RAZMAK OSI ZUPČASTOG PARA 4-4 KOD IZLAZNOG VRATILA

2

Za poznati ulazni moment T_1 : [Nm]

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

Za vrstu ozubljenja ravnih zubi zupčanika uzimamo iz tablice:

$$K_1 = 6840$$

$$K_2 = 320$$

Faktor širine zupčanika:

$$\psi_{bd} \approx (0,1 \dots 0,3 \dots 0,5) + \frac{i_z}{20}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \left(\frac{5,83}{20}\right)$$

Za zupčanike sa mekim zubima (konstrukcijski čelik):

$$\psi_{bd} = 0,8 \leq 1,6$$

Faktor primjene : $K_A = 1$

Faktor dodatnih dinamičkih opterećenja: $K_v = 1,1$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu: $K_{H\alpha} = 1$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba u zahvatu: $K_{H\beta} = 1,12$

Minimalna sigurnost na pitting: $S_{Hmin} = 1,1$

Materijal: Materijal iz tablice pod tipom materijala čelici za cementaciju s termičkom obradom cementacija + kaljenje: Č4321

Trajna dinamička čvrstoća površine boka zuba: $\sigma_{Hlim} = 1510 \text{ Mpa}$



10.1 Razmak osi zupčastog para međuvratila 1

$$a \geq 320 \cdot (5.83+1) \sqrt[3]{\frac{4486.247}{0,8} \cdot \frac{5.83+1}{5.83} \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,12 \left(\frac{1,1}{1510}\right)^2}$$

$$a \geq 420.6977 \text{ mm}$$

Usvojeni razmak osi:

$$a = 430.000 \text{ [mm]}$$

10.2 Izbor modula

$$m \approx 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2} = 0,1 \cdot \frac{430 \cdot 5,83}{(1+5,83)^2}$$

$$m = 5.37397452 \text{ mm}$$

Usvojeni razmak osi: $m = 6 \text{ mm}$

Nagib zuba: $\beta = 17^\circ$

$$\text{Broj zubi pogonskog zupčanika: } z_1 = \frac{2a \cos \beta}{m(i_z+1)} = \frac{2 \cdot 430 \cos(17^\circ)}{6 \cdot (5,83+1)} = 20.1729$$

10.3 Broj zubi pogonskog zupčanika

$$z_1 = 20$$

10.4 Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = i_z \cdot z_1 = 5,83 \cdot 20 = 116.60$$

Usvojeni broj zubi gonjenog zupčanika: $z_2 = 117, 00$

Točan (računski) prijenosni omjer:

$$u = i = \frac{117}{20}$$

$$u = i = 5.85000$$



Odstupanje od i_z :

$$\Delta i = \left(1 - \frac{i_z}{i}\right) = \left(1 - \frac{5,83}{5.85000}\right)$$

$$\Delta i = 0.00342 < 0,025$$

10.5 Diobeni promjeri

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

$$d_1 = \frac{6 \cdot 20}{\cos(17^\circ)} = 125.483 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_1 = 125 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m \cdot z_2}{\cos \beta} = \frac{6 \cdot 117}{\cos(17^\circ)}$$

$$d_2 = 734.076 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_2 = 735 \text{ mm}$$

10.6 Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{(125.483 + 734.076)}{2}$$

$$a_d = 429.779 \text{ mm}$$

$$a_d < a \quad a - a_d = 2.437 < 5 \text{ mm}$$

10.7 Širina zupčanika

Širina gonjenog zupčanika:

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot b = 0.7 \cdot 125.483$$

$$b = b_2 = 98.807 \text{ mm}$$

Usvojena širina gonjenog zupčanika:



$$b = b_2 = 100 \text{ mm}$$

$$b_1 = b + 5 = 100 + 5$$

$$b_1 = 105 \text{ mm}$$

10.8 Stupanj prekrivanja koraka

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi m_n} = \frac{105 \cdot 0.275637356}{\pi \cdot 6}$$

$$\varepsilon_\beta = 1.629$$

Zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku: $\alpha_n = 20^\circ$

Za ravne zube: $\alpha_t = \alpha_n = 20.837^\circ$

10.9 Pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos \alpha_t\right) = \arccos\left(\frac{429.779}{430.000} \cos(20^\circ)\right)$$

$$\alpha_{wt} = 21.674^\circ$$

10.10 Suma faktora pomaka profila

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

$$\text{inv} \alpha_{wt} = \tan \alpha_{wt} - \frac{\pi \alpha_{wt}}{180} = \tan(21.674^\circ) - \frac{\pi \cdot 21.553}{180} = 0.0191$$

$$\text{inv} \alpha_t = \tan \alpha_t - \frac{\pi \alpha_t}{180} = \tan(20^\circ) - \frac{\pi \cdot 20^\circ}{180} = 0.0169$$

$$x_1 + x_2 = \frac{0.0191 - 0.0169}{2 \tan 20^\circ} \cdot (20 + 117)$$

$$x_1 + x_2 = 0.037$$



10.11 Raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG

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

$$x_1 = \frac{.037}{2} + \frac{[1 - (0.037)] \ln 4}{2 \ln \left(\frac{20 \cdot 117}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0.269$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1 = 0.037 - 0.269$$

$$x_2 = -0.232$$

10.12 Ekvivalentni brojevi zubi

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} = \frac{20}{\cos^2(0,005) \cdot \cos(17^\circ)} = 22.6$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cdot \cos \beta} = \frac{117}{\cos^2(0,005) \cdot \cos(17^\circ)} = 132.3$$

10.13 Promjer preko korijena zuba

$$d_{f1} = m \cdot \left(\frac{z_1}{\cos \beta} + 2x_1 - 2,5 \right) = 6 \cdot \left(\frac{20}{\cos(17^\circ)} + 2 \cdot 0.269 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 113.703 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m \cdot \left(\frac{z_2}{\cos \beta} + 2x_2 - 2,5 \right) = 6 \cdot \left(\frac{129}{\cos(17^\circ)} + 2 \cdot (-0.232) - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 716.293 \text{ mm}$$

10.14 Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2} - 0,5 \text{ mm}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 430 - 742.846 - 0,5 \cdot 6$$

$$d_{a1} = 141,034 \text{ mm}$$



Usvojeno:

$$d_{a1} = 141.000 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1} - 0,5 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 742.846 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_{a2} = 743.500 \text{ mm}$$

10.15 Promjer temeljnih krugova

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

$$d_{b1} = 125.483 \cdot \cos (20.837^\circ)$$

$$d_{b1} = 117.276 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t = 734.076 \cdot \cos (20.837^\circ)$$

$$d_{b2} = 686.065 \text{ mm}$$

10.16 Promjeri pogonskih krugova

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

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 430}{5,83 + 1}$$

$$d_{w1} = 125.547 \text{ mm}$$

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

$$d_{w2} = 2 \cdot 430 - 125.547$$

$$d_{w2} = 734.453 \text{ mm}$$



10.17 Stupanj prekrivanja profila

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{6}{\cos(17^\circ)}$$

$$m_t = 6.274 \text{ mm}$$

Kosi zubi :

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

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{141.000^2 - 117.276^2} + \sqrt{743.500^2 - 686.065^2} - 2 \cdot 430 \cdot \sin(21.674^\circ)}{2\pi \cdot 3 \cdot \cos(20.837^\circ)}$$

$$\varepsilon_\alpha = 1.570 \geq 1,1$$

10.18 Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

$$S_{an1} = d_{a1} \left(\frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2Z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

$$S_{an1} = 141.000 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot 0.269 \cdot \tan(20^\circ)}{2 \cdot 20} + 0.01692 - 0.07889 \right) \cdot \cos(0.01692924539$$

$$17.9498^\circ) = 0.585 \text{ mm} > 0,4$$

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

$$\alpha_{at1} = \arccos \left(\frac{117.276}{141.000} \right) = 33.719^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right) = \arctan \left(\frac{141.000}{125.483} \tan(17^\circ) \right) = 17.949^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180} = \tan(33.719^\circ) - \frac{\pi \cdot 32.8149^\circ}{182} = 0.07889$$

10.19 Relativna debljina vrhi zuba

$$S_{an2} = d_{a2} \cdot \left(\frac{\pi + 4x_2 \tan \alpha_n}{2Z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$



$$S_{an2} = 743.500 \cdot \left(\frac{\pi + 4 \cdot (-.232) \cdot \tan(20^\circ)}{2 \cdot 117} + 0.016929245 - 0.021545822 \right) \cdot \cos \beta_{a2}$$

$$S_{an2} = 0.815 \text{ mm} > 0,4$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \left(\frac{734.076}{743.500} \right) = 22.510^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right) = \arctan \left(\frac{743.500}{734.076} \right) \cdot \tan(17^\circ) = 16.261^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180} = \tan(22.510^\circ) - \frac{\pi \cdot 22.510^\circ}{180} = 0.0215$$



11. KONTROLNI PRORAČUN ZUPČASTOG PARA 4-4

11.1 Nosivost boka zuba

Kontaktni pritisak (Hertzov) na bokovima spregnutih zupčanika:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{bd_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Faktor modula elastičnosti za čelik iznosi: $Z_E = 190 \sqrt{MPa}$

11.2 Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20)} \sqrt{\frac{2 \cos(0,005^\circ)}{\tan(21.553^\circ)}}$$

$$Z_H = 2.40$$

11.3 Faktor nagiba zuba

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

$$Z_\beta = 0.98$$

11.4 Faktor utjecaja prekrivanja za zupčanike sa ravnim zubima

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{4 - \epsilon_\alpha}{3}} = \sqrt{\frac{4 - 1.570}{3}}$$

$$Z_\epsilon = 0,80$$

11.5 Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1}$$



$$F_t = \frac{2000 \cdot 4486.247}{125.483}$$

$$F_t = 71503.65 \text{ N}$$

Faktor primjene: $K_A = 1,1$

11.6 Obodna brzina zupčanika

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{125.483 \cdot 596.00}{19100}$$

$$v_1 = 3.92 \frac{\text{m}}{\text{s}} < 14$$

Kvaliteta ozubljenja dobiveno iz tablice: $Q = 8$ (*srednje glodano*)

Obrada: dobiveno iz tablice - brušeno

Hrapavost boka zuba (dobiveno iz tablice):

$$R_z = 3 \mu\text{m}$$

$$K_v = K_{v\alpha} = 1 + 1,8Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 1,8 \cdot 8^2 \cdot 3.92 \cdot 20 \cdot 10^{-5}$$

$$K_v = K_{v\alpha} = 1.028$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu: $K_{H\alpha} = 1.1$

11.7 Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left(\frac{b}{d_1}\right)^2 + 0,0005b = 1,17 + 0,18 \left(\frac{110}{125.483}\right)^2 + 0,0005 \cdot 110$$

$$K_{H\beta} = 1.189$$

$$\sigma_H = 1007.21 \text{ MPa}$$

$$\text{Sigurnost na pitting: } S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{Hmin}$$

Minimalna sigurnost na pitting uzeta iz tablice materijala: $\sigma_{Hlim} = 1510 \text{ MPa}$



Hydroelastično – tribomehanički faktor: $Z_{LVR} = 1.00$

Faktor povećanja tvrdoće: $Z_W = 1.00$

11.8 Faktor utjecaja veličine očitane iz tablice

$$Z_X = 1.00$$

$$S_H = \frac{1510}{1007.21} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_H = 1.52 > 1.1 S_{Hmin}$$

Naprezanje na savijanje: $\sigma_F = \frac{F_t}{b_m} Y_{FS} Y_\beta Y_\varepsilon K_A K_V K_{Fa} K_{F\beta}$

11.9 Fiktivni broj zuba

$$z_{n1} = 22.6$$

$$z_{n2} = 132.3$$

11.10 Faktor zahvata na vrhu zuba

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot x1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \cdot \frac{x1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,269^2 + \frac{7,63}{22,6} - 15,94 \cdot \frac{0,269}{22,6}$$

$$Y_{FS1} = 3.092$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot x2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \cdot \frac{x2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,269^2 + \frac{7,63}{132,3} - 15,94 \cdot \frac{0,269}{132,3}$$

$$Y_{FS2} = 3.336$$



Faktor kuta nagiba:

$$Y_{\beta} = 1 - \frac{\varepsilon_{\beta} \cdot \beta}{120} = 1 - \frac{1.629 \cdot 17^{\circ}}{120} = 0.86$$

11.11 Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\varepsilon} = 0.25 + 0.75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_{\alpha}} = 0.25 + 0.75 \frac{\cos^2(17^{\circ})}{1.570}$$

$$Y_{\varepsilon} = 0.73$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu: $K_{F\alpha} = 1.039$

11.12 Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\alpha}^{0.9} = 1.039^{0.9} = 1.163$$

$$\sigma_{F1} = \frac{71503.65}{110 \cdot 6} \cdot 3.092 \cdot 0.86 \cdot 0.73 \cdot 1.023 \cdot 1.1 \cdot 1.039 \cdot 1.163$$

$$\sigma_{F1} = 372.36 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{F2} = \frac{71503.65}{110 \cdot 6} \cdot 3.336 \cdot 0.86 \cdot 0.73 \cdot 1.023 \cdot 1.1 \cdot 1.039 \cdot 1.163$$

$$\sigma_{F2} = 401.65 \text{ Mpa}$$

11.13 Sigurnost protiv loma

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

$$S_F = 2.69$$

$$S_{Fmin} = 1.6 \dots 3$$

Reduktori su visoke pouzdanosti čiji lom može izazvati veće materijalne štete; teško su dobavljivi rezervni dijelovi.



11.14 Dinamička čvrstoća korijena zuba iz tablice materijala

$$\sigma_{FE} = 1000 \text{ Mpa}$$

Faktor osjetljivosti materijala na koncentratore naprezanja: $Y_\delta = 1$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba: $Y_R = 1$

11.15 Faktor veličine zupčanika

$$Y_X = 1$$

$$S_{F1} = \frac{1000}{372.36} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_{F1} = 2.69 \geq 1.1$$

$$S_{F2} = \frac{1000}{401.65} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_{F2} = 2.50 \geq 1.1$$

11.16 Bočna zračnost zuba

$$A_{sne1} = -95 \mu\text{m}$$

$$A_{sne2} = -175 \mu\text{m}$$

$$T_{sn1} = 130 \mu\text{m}$$

$$T_{sn2} = 200 \mu\text{m}$$

$$A_{sni1} = A_{sne1} - T_{sn1} = -225 \mu\text{m}$$

$$A_{sni2} = A_{sne2} - T_{sn2} = -375 \mu\text{m}$$

$$A_{ai} = -31.5 \mu\text{m}$$

$$A_{ae} = 31.5 \mu\text{m}$$

$$j_{nmin} = -(A_{sne1} + A_{sne2}) \cos \alpha_n + 2A_{ai} \sin \alpha_n$$

$$j_{nmin} = -(-225 + (-175)) \cos(20^\circ) + 2 \cdot (-31.5) \sin(20^\circ)$$



$$j_{\text{nmin}} = 232 \mu\text{m}$$

$$j_{\text{nmax}} = -(A_{\text{sni1}} + A_{\text{sni2}}) \cos \alpha_n + 2A_{\text{ae}} \sin \alpha_n$$

$$j_{\text{nmax}} = -(-225 + (-375)) \cos(20^\circ) + 2 \cdot 20 \sin(31.5^\circ)$$

$$j_{\text{nmax}} = 585 \mu\text{m}$$

11.17 Tetivna mjera debljine zubi

$$k_1 = 3$$

$$k_2 = 12$$

$$W_k = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k - \frac{z}{2|z|} \right) \pi + z \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot x \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k1} = 6 \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k_1 - \frac{20}{2|20|} \right) \pi + 20 \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2 \cdot 0.269 \cdot 6 \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k1} = 6 \cdot \cos(20^\circ) \left[\left(3 - \frac{21}{2|21|} \right) \pi + 20 \cdot 0.016929 \right] + 2 \cdot 0.269 \cdot 6 \cdot \sin(20^\circ)$$

$$W_{k1} = 47.294 \text{ mm}$$

$$W_{k2} = m \cdot \cos \alpha_n \left[\left(k_2 - \frac{z_2}{2|z_2|} \right) \pi + z_2 \cdot \text{inv} \alpha_t \right] + 2x_2 \cdot m \cdot \sin \alpha_n$$

$$W_{k2} = 6 \cdot \cos(20^\circ) \left[\left(12 - \frac{117}{2|117|} \right) \pi + 117 \cdot 0.016929 \right] + 2 \cdot (-0.232) \cdot 3 \cdot \sin(20^\circ)$$

$$W_{k2} = 267.051 \text{ mm}$$

$$A_{\text{we}} = 0,94 \cdot A_{\text{sne}}$$

$$A_{\text{wi}} = 0,94 \cdot A_{\text{sni}}$$

$$A_{\text{we1}} = 0,94 \cdot A_{\text{sne1}} = 0,94 \cdot (-95) = -89.3 \mu\text{m}$$

$$A_{\text{we2}} = 0,94 \cdot A_{\text{sne2}} = 0,94 \cdot (-175) = -164.5 \mu\text{m}$$

$$A_{\text{wi1}} = 0,94 \cdot A_{\text{sni1}} = 0,94 \cdot (-225) = -211.5 \mu\text{m}$$



$$A_{wi2}=0,94 \cdot A_{sni2}=0,94 \cdot (-375) = -258.5 \mu\text{m}$$

11.18 Izbor ulja za podmazivanje

Obodna brzina na diobenom krugu:

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{125.483 \cdot 596.00}{19100} = 3.92 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

11.19 Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1}$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 4486.247}{125.483}$$

$$F_t = 71503.65 \text{ N}$$

11.20 Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3 F_t}{b d_1} \frac{i+1}{i} = \frac{3 \cdot 71503.65}{110 \cdot 125.483} \cdot \frac{5.83+1}{5.83} = 20.136 \text{ Mpa}$$

11.21 Potrebna viskoznost ulja

$$\nu_{40} = 208 \left(\frac{k_s}{v} \right)^{0,418} = 208 \left(\frac{20.136}{3.92} \right)^{0,418} = 413.3093012 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

Izabrano ulje po tablici:

ulje- MOBILGEAR 632



11.22 Izbor i kontrola trajnosti ležajeva

Minimalni promjer pogonskog vratila:

$$d_{vr1} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{tdop}}}$$

$$T_1 = \frac{P^1}{\omega_1} = \frac{280 \cdot 10^3}{62.41} = 4486.247 \text{ Nm}$$

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 596.00}{30} = 62.41$$

$$R_{dt-1} = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{tdop} = \frac{R_{dt-1}}{10 \dots 12} = \frac{300}{10} = 27.2727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$d_{vr1} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 4486.247}{\pi \cdot 27.27}}$$

$$d_{vr1} \geq 94.132 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$d_{vr1} = 95 \text{ mm}$$

11.23 Minimalni promjer gonjenog vratila

$$d_{vr2} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 T_2}{\pi \tau_{tdop}}}$$

$$T_2 = T_1 i = 4486.247 \cdot 5.83 = 26244.540 \text{ Nm}$$

$$d_{vr2} \geq \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 26244.540}{\pi \cdot 27.27}}$$

$$d_{vr2} \geq 89.003$$



Usvojeno:

$$d_{vr2} = 90 \text{ mm}$$

11.24 Sile na ozubljenju

$$F_{bn} = F_{bn1} = F_{bn2} = \frac{F_t}{\cos \alpha_{wt}} = \frac{22201.71}{\cos(21.553^\circ)} = -24515.62492 \text{ N}$$

Obodna sila:

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot T_1}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 71503.65}{125.547 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_{wt} = 71466.95 \text{ N}$$

11.25 Radijalna sila

$$F_r = F_{r1} = F_{r2} = F_{wt} \cdot \tan \alpha_w$$

$$F_r = 27310.57 \text{ N}$$

11.26 Aksijalna sila

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w = 21860.86 \text{ N}$$

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \tan \beta = 0.2883$$

Reakcije u ležajevima:

$$A_z = \frac{F_r}{2} = 14138.9959 \text{ N}$$

$$B_z = \frac{F_r}{2} = 14138.9959 \text{ N}$$

$$A_x = \frac{F_{wt}}{2} = \frac{71466.95}{2} = 35576.5104 \text{ N}$$

$$B_x = \frac{F_{wt}}{2} = \frac{71466.95}{2} = 35576.5104 \text{ N}$$

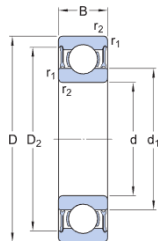
Ukupne reakcije u ležajevima:

$$F_A = \sqrt{A_x^2 + A_z^2} = 38283.14645 \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{B_x^2 + B_z^2} = 38283.14645 \text{ N}$$

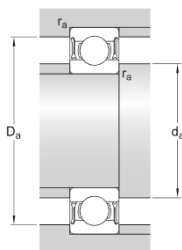
11.27 Trajnost ležajeva

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_1} \geq L_{hmin}$$



Dimensions

d	105 mm	Bore diameter
D	130 mm	Outside diameter
B	13 mm	Width
d ₁	≈ 112.25 mm	Shoulder diameter
D ₂	≈ 124.4 mm	Recess diameter
r _{1,2}	min. 1 mm	Chamfer dimension



Abutment dimensions

d _a	min. 110 mm	Diameter of shaft abutment
d _a	max. 112 mm	Diameter of shaft abutment
D _a	max. 125 mm	Diameter of housing abutment
r _a	max. 1 mm	Radius of shaft or housing fillet

Slika 11.1 Proračun ležaja SKF za vratilo 4

$$P = F_A = F_B = 27310.57 \text{ N}$$

$$L_{hl} = \left(\frac{C}{P}\right)^k \frac{10^6}{60n_1} = \left(\frac{20800}{27310.57}\right)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 596.00} = 12353.789 \text{ h} > 12000$$

$$L_{hskf} = 65600 \text{ h}$$



11.28 Kontrola klinova i pera

$$l \geq \frac{2000T}{d(h - t_1)p_{dop}}$$

$$p_{dop} = 180 \text{ MPa}$$

$$d_{vr2} = 90 \text{ mm}$$

b	h	t_1	t_2
20 mm	12 mm	7,5 mm	4,9 mm

$$l_2 \geq \frac{2000 \cdot 4486,247}{125,483 \cdot (12 - 7,5) \cdot 180} \geq 88,2761 \text{ mm}$$

Usvojeno:

$$l = 90 \text{ mm}$$

12. IZBOR ULJA ZA PODMAZIVANJE I SUSTAVA HLAĐENJA ULJA

Svojstva	INA Epol SP								Metoda	
ISO -L-CKC	68	100	150	220	320	460	680	1000	ISO 3448	
ANSI/AGMA 9005-E02	2EP	3EP	4EP	5EP	6EP	-	-	-	-	
Gustoća pri 15 °C, g/cm ³	0,885	0,888	0,893	0,898	0,902	0,906	0,916	0,932	ISO 3675	
Kinematička viskoznost, mm ² /s										
- pri 40 °C	68	100	150	220	320	460	680	940	ISO 3104	
- pri 100 °C	8,5	11,0	14,4	18,6	23,6	29,9	37,6	42,1		
Indeks viskoznosti	94	92	93	93	93	93	91	80	ISO 2909	
Plamište, (COC) °C	210	220	230	240	250	260	270	290	ISO 2592	
Tecište, °C	-24	-22	-22	-22	-21	-16	-11	-6	ISO 3016	
Korozivnost (Cu, 100 °C, 3 h)	1 b								ISO 2160	
Deemulzivnost									ASTM D 2711	
-slobodna voda, ml	82									
-emulzija, ml	0,5									
-voda u ulju, %	0,4									
Izdvajanje vode (deemulzivnost)										ISO 6614
- pri 54 °C, 40-37-3 ml, min	20	-								
- pri 82 °C, 40-37-3 ml, min	-	20								
EP Test - točka zavarivanja, N	3150								ASTM D 2783	
Srednji promjer istrošenja (193 N/1800 min ⁻¹ /54 °C/1 h), mm	0,30								ASTM D 4172	
FZG, A/8,3/90	12								DIN 51354	
Timken, N	295								ASTM D 2782	

Slika 12.1 Svojstva ulja

Za sistem hlađenja ulja u reduktoru odabrano je optočno hlađenje; hladnjak ulje-voda s pumpom motora SEW OWC070.

12.1 Konstrukcija sustava za hlađenja

- izmjenjivač topline ulja-vode
- temperaturna sklopka u dvije uklopne točke
- pumpa s direktno ugrađenim asihronim motorom

Sistem za hlađenje je iskorišten i za podmazivanje zupčanika, na način da pumpa kada motor radi cijelo vrijeme, a ulje izlazi na zupčanike. Prelaskom temperature ulja preko 40° uključuje izmjenjivač topline ulje-voda, a u slučaju da temperatura ulja postigne 90° isključuje reduktor.



13. ZAKLJUČAK

Pomoću proračuna utvrđeno je da dvostruki dvostupanjski horizontalni reduktor zadovoljava sve navedene uvjete. Reduktor je ispravan za rad te može obavljati sve svoje funkcije .

Proračun je provjeren pomoću programa Gerpacka. Za izradu proračuna koristio sam svu dostupnu literaturu i znanje stječeno na nastavi.



14.LITERATURA

- [1] Kraut , B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1978
- [2] SKF – online katalog <http://www.skf.com/>
- [3] Vrcan Ž.: Proračun jednostupanjskog reduktora (interna skripta)
- [4] Orlić, Ž.; Reduktor, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2001. (interna skripta)



15. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

a	razmak osi	mm
m	modul	mm
z	broj zubi	
Δi	razlika prijenosnih omjera	%
i	prijenosni omjer	
i_1	prijenosni omjer 1.stupnja	
i_2	prijenosni omjer 2.stupnja	
d	diobeni promjeri	mm
ad	teoretski razmak osi	mm
b	širina zupčanika	mm
$\varepsilon\beta$	stupanj prekrivanja koraka	
α_{nn}	zahvatni kut na diobenom promjeru u čeonom presjeku	
α_{wt}	pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku	
x_1+x_2	suma faktora pomaka profila	mm
$Z_{n1,2}$	raspodjela sume faktora pomaka profila prema postupku MAAG	
df	promjeri preko korijena zuba	mm
da	promjeri preko glave zuba	mm
db	promjeri temeljnih krugova	mm
dw	promjeri pogonskih krugova	mm
$\varepsilon\alpha$	stupanj prekrivanja profila	
mt	čeonni modul	mm
α_w	pogonski zahvatni kut V-parova	°
β	kut nagiba boka zuba na diobenoj kružnici	°
β_w	kut nagiba boka zuba na kinematskoj kružnici	°
$\varepsilon\beta$	stupanj prekrivanja bočne linije	



Φ	proizvedena toplina	kJ/h
λ	faktor širine zuba	
σ_F	naprezanje na savijanje u korijenu zuba	N/mm ²
σ_{Flim}	dinamička čvrstoća kod naprezanja na savijanje korijena zuba	N/mm ²
σ_{FP}	praktično dozvoljena vrijednost naprezanja u korijenu zuba	N/mm ²
σ_H	Hertz-ov (kontaktni) pritisak u kinematskom polu C	N/mm ²
σ_{Hlim}	dinamička čvrstoća kontaktnog pritiska	N/mm ²
σ_{HP}	praktično dozvoljena vrijednost kontaktnog pritiska	N/mm ²
ZH	faktor oblika boka za proračun na dodirni pritisak	
Z ϵ	faktor utjecaja stupnja prekrivanja za proračun opterećenja bokova	
YF	faktor oblika za proračun opterećenja korijena zuba	
SF	faktor sigurnosti protiv loma u korijenu zuba	
SH	faktor sigurnosti protiv ljuštenja bokova zuba (pitting)	
v	obodna brzina na diobenoj kružnici	m/s
k _s	Stribeck-ov pritisak	N/mm ²
P	snaga	W
L _h	trajnost ležaja	h
T	okretni moment	N
W _k	nazivna vrijednost preko k _z	
v ₄₀	viskoznost ulja na 40°C	mm ² /s
ω	obodna brzina	rad/s
C	dinamička nosivost ležaja	N
C ₀	statička nosivost ležaja	N



16. SAŽETAK

Cilj završnog rada bio je dimenzionirati i proračunati sve potrebne parametre za izvedbu dvostrukog dvostupanjskog horizontalnog reduktora izlazne snage $P_1=240$ kW i $P_2 = 280$ kW. Proračunom osnovnih parametara izračunat je standardni razmak osi i dimenzije zupčanika. Nakon toga su proračunate nosivosti korijena i boka svakog zupčanika, dimenzije svih vratila, te su pomoću skfa i zadanih vrijednosti odabrani ležajevi i sistem za hlađenje i podmazivanje zupčanika.

Reduktor je izrađen prema standardima i zadovoljava svim zadanim uvjetima.

KLJUČNE RIJEČI: Zupčanik, reduktor, vratilo, ležaj, modul, moment, prijenosni omjer
sistem za hlađenje

ABSTRACT:

The task of the undergraduate assignment was to design and calculate all necessary parameters for double two-stage horizontal reducer with output power $P_1=240$ kW and $P_2=280$ kW. By calculating the basic parameters, we got axis distance and gear dimension. After that other dimensions like shaft dimensions bearings cooling system are calculated. Reducer is built according to standards and meets all required conditions.

KEYWORDS:

Gear, shaft, bearing, power, module, moment, speed reduction.



17.Prilozi

A Tehnička dokumentacija