

POLITEHNIKA PULA

Visoka tehničko-poslovna škola s p.j.

Stručni studij politehnike

Proračun i konstrukcija 1-stupnjaskog reduktora s cilindričnim ravnim zubima

Timski projektni zadatak

Kristijan Cetina¹, Stjepan Grgin², and Igor Mrkić³

¹kcetina@politehnika-pula.hr JMBAG: 2424011721

²sgrgin@politehnika-pula.hr JMBAG: 0112005802

³imrkic@politehnika-pula.hr JMBAG: 0114017089

Pula, 24. studenoga 2018.

Sažetak

U ovom radu predstavljamo proračun strojnog sklopa - 1-stupanjskog reduktora zajedno s pripradajućim vratilima i ležajevima koji je zadan kao sastavni dio kolegija Konstrukcije.



ZADATAK ZA PROGRAM "JEDNOSTUPANJSKI REDUKTOR"

Proračunati i konstruirati prijenos s cilindričnim zupčanicima s ravnim zubima prema predlošku broj 3 ako su zadani sljedeći pogonski podaci:

Pogonski podaci:

- pogonski stroj: **Klipni stroj**
- radni stroj: **Bager**
- ulazna snaga: **$P_1 = 14 \text{ kW}$**
- ulazna brzina vrtnje: **$n_1 = 1100 \text{ min}^{-1}$**
- prijenosni omjer: **$i_z = 4$**
- materijal zupčanika: **E360 (Č0745)**
- min. trajnost ležaja: **$L_{hmin} = 19000 \text{ sati}$**

Program mora obuhvatiti:

- a) proračun dimenzija zupčanika
- b) proračun vratila
- c) proračun steznog spoja
- d) proračun trajnosti valjnih ležajeva
- e) sklopni crtež sa sastavnicom
- f) radioničke crteže vratila i zupčanika

Proračun treba biti popraćen odgovarajućim komentarima, te dopunjen potrebnim skicama.

Zadano: 25.10.2018.

Rok predaje: 24.1.2019.

Z a d a o:

Feda Balić, mag. ing. mech.

Sadržaj

1	Opis zadatka i ograničenja	5
1.1	Uvod	5
2	Proračun sklopa	7
2.1	Proračun dimenzija zupčanika	7
2.2	Proračun sila i momenata na zupčanicima	9
2.3	Proračun vratila	10
2.3.1	Preliminarni proračun vratila	10
2.3.2	Kontrolni proračun vratila	12
2.4	Proračun steznog spoja	12
2.5	Proračun valjnih ležajeva	12
	Literatura	13
	Dodatak A: Radionički nacrt pogonskog vratila	14
	Dodatak B: Radionički nacrt gonjenog vratila	15

Poglavlje 1

Opis zadatka i ograničenja

1.1 Uvod

Ovaj projektni zadatak nasto je kao obavezni zadatak u sklopu kolegija Konstrukcije koji se održava pod vodstvom Milenka Jokića, dipl.ing., predavača na stručnom studiju politehnike pri Politehnici Pula te asistenciju Feđe Balića, mag. ing. mech.

Prema zadanom predlošku (predložak 3) i zadanim podacima konstriran je 1-stupanjski reduktor s cilindričnim ravnim zubima. Uvedena su sljedeća pojednostavljena i zanemareni sljedeći dijelovi proračuna:

- kontrolni proćun
- izbor ulja za podmazivanje
- toplinski proraćun
- odrećivanje stupnja korisnosti

Kod proraćuna dimenzija zupćanika zanemareni su sljedeći proraćuni:

- nosivost boka zuba
- sigurnost na *pitting* (površinski zamor)
- nosivost korjena zuba

Kod proraćuna vratila izražena je samo kontrola na plastićnu deformaciju te je zanemarena kontrola na zamor materijala.

Poglavlje 2

Proračun sklopa

2.1 Proračun dimenzija zupčanika

Na temelju poznatih pogonskih podatak određen je minimalni diobeni promjer pogonskog zupčanika po izrazu

$$d_1 \geq 4045 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_1}{\psi_b \cdot n_1} \cdot \frac{i_z + i}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot \left(\frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hlim}}\right)^2} \quad (2.1)$$

Pri čemu je $\psi_b = 1$ - omjer širine zupčanika i diobenog promjera, $P_1 [kW]$ - snaga pogonskog stroja, $n_1 [s^{-1}]$ - broj okretaja pogonskog stroja, i_z - željeni prijenosni omjer, $K_A = 2$ - faktor primjene očitane iz tablice [1], $K_V = 1$ - faktor dodatnih dinamičkih opterećenja, $K_{H\alpha} = 1$ - faktor raspodjele opterećenja na zube koji su istovremeno u zahvatu, $K_{H\beta} = 1$ - faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba, $S_{Hmin} = 1,3$ - stupanj sigurnosti na površinski zamor (*pitting*), $\sigma_{Hlim} = 1$ - trajna dinamička čvrstoća boka zuba na kontaktna naprezanja.

Uvrštavanje poznatih podataka u (2.1) dobije se minimalni diobeni promjer pogonskog zupčanika

$$d_1 \geq 100,3 \text{ mm}$$

Broj zuba pogonskog zupčanika određen je u odnosu na njegovu kutnu brzinu po izrazu

$$\nu = \frac{d_1 \cdot n_1 \cdot \pi}{60} \quad (2.2)$$

Uvrštavanje poznatih podataka u (2.2) dobivena je kutna brzina

$$\nu = 5,77 \text{ ms}^{-1}$$

te je iz tablice [1] očitane mogući raspon broja zuba te je usvojen

$$z_1 = 21$$

Broj zuba gonjenog zupčanika je određen

$$z_2 = z_1 \cdot i_z$$

$$z_2 = 21 \cdot 4$$

$$z_2 = \mathbf{84}$$

Stvarni i željeni omjer su isti

$$i_z = i_{\text{stv}} = \frac{z_2}{z_1} = \mathbf{4}$$

Normalni modul zuba m_n je izračunat:

$$m_n = \frac{d_1}{z_1}$$

$$m_n = \frac{100,3}{21}$$

$$m_n = 4,776 \text{ mm} \Rightarrow \mathbf{m_n = 5 \text{ mm}}$$

Razmak između osi zupčanika a je određen:

$$a = \frac{m_n}{2} \cdot (z_1 + z_2)$$

$$a = \frac{5}{2} \cdot 105$$

$$a = \mathbf{262,5 \text{ mm}}$$

Stvarni diobeni promjer pogonskog zupčanika izračunat je u odnosu na normalni modul i ranije određen broj zuba

$$d_1 = m_n \cdot z_1$$

$$d_1 = 5 \cdot 21$$

$$d_1 = \mathbf{105 \text{ mm}}$$

Širina gonjenog zupčanika:

$$b_2 = \psi_b \cdot d_1$$

$$b_2 = 1 \cdot 105$$

$$b_2 = \mathbf{105 \text{ mm}}$$

Širina pogonskog zupčanika je uvećana za 5 mm u odnosu na gonjeni zupčanik radi aksijalnih pomaka

$$b_1 = b_2 + 5 \text{ mm}$$

$$b_1 = \mathbf{110 \text{ mm}}$$

Diobeni promjer gonjenog zupčanika:

$$\begin{aligned}d_2 &= m_n \cdot z_2 \\d_2 &= 5 \cdot 84 \\d_2 &= \mathbf{420 \text{ mm}}\end{aligned}$$

Zahvatni kut između zupčanika je odabran standardni kut $\alpha_n = 20^\circ$. Radikalna zračnost:

$$\begin{aligned}c &= c^* \cdot m_n \\c &= 0,25 \cdot 5 \\c &= \mathbf{1,25 \text{ mm}}\end{aligned}$$

Visina korijena zuba:

$$\begin{aligned}h_f &= m_n + c \\h_f &= 5 + 1,25 \\h_f &= \mathbf{6,25 \text{ mm}}\end{aligned}$$

Promjer preko korijena zuba zupčanika:

$$\begin{aligned}d_{f1} &= d_1 - 2 \cdot h_f & d_{f2} &= d_2 - 2 \cdot h_f \\d_{f1} &= 105 - 2 \cdot 6,25 & d_{f2} &= 420 - 2 \cdot 6,25 \\d_{f1} &= \mathbf{92,5 \text{ mm}} & d_{f2} &= \mathbf{407,5 \text{ mm}}\end{aligned}$$

Promjer preko glave zuba zupčanika:

$$\begin{aligned}d_{a1} &= 2 \cdot a - d_{f2} - 2 \cdot c & d_{a2} &= 2 \cdot a - d_{f1} - 2 \cdot c \\d_{a1} &= 2 \cdot 262,5 - 407,5 - 2 \cdot 1,25 & d_{a2} &= 2 \cdot 262,5 - 92,5 - 2 \cdot 1,25 \\d_{a1} &= \mathbf{115 \text{ mm}} & d_{a2} &= \mathbf{430 \text{ mm}}\end{aligned}$$

2.2 Proračun sila i momenata na zupčanicima

Moment na ulaznom vratilu:

$$\begin{aligned}T_1 &= \frac{P_1}{\omega_1} \\T_1 &= \frac{14 \cdot 10^3 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1100} \\T_1 &= \mathbf{121,5 \text{ Nm}}\end{aligned}$$

Snaga na izlaznom vratilu je umanjena za gubitke u sustavu.

$$\begin{aligned}P_2 &= \prod_{i=1}^n \eta_i \cdot P_1 \\P_2 &= (0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,98) \cdot 14 \cdot 10^3 \\P_2 &= \mathbf{13311 \text{ W}}\end{aligned}$$

Brzina vrtnje izlaznom vratila $n_2 = \frac{n_1}{i} = \frac{1100}{4} = \mathbf{275 \text{ min}^{-1}}$. Moment na izlaznom vratilu:

$$T_2 = \frac{P_1}{\omega_1}$$

$$T_2 = \frac{13311 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 275}$$

$$T_2 = \mathbf{462 \text{ Nm}}$$

Obodna sila na zupčanicima:

$$F_{t1} = \frac{2 \cdot T_1}{d_1} \qquad F_{t2} = \frac{2 \cdot T_2}{d_2}$$

$$F_{t1} = \frac{2 \cdot 121,5}{0,105} \qquad F_{t2} = \frac{2 \cdot 462}{0,42}$$

$$F_{t1} = \mathbf{2314 \text{ N}} \qquad F_{t2} = \mathbf{2200 \text{ N}}$$

Radijalna sila na zupčanicima:

$$F_{r1} = F_{t1} \cdot \tan \alpha_n \qquad F_{r2} = F_{t2} \cdot \tan \alpha_n$$

$$F_{r1} = 2314 \cdot \tan 20^\circ \qquad F_{r2} = 2200 \cdot \tan 20^\circ$$

$$F_{r1} = \mathbf{842 \text{ N}} \qquad F_{r2} = \mathbf{801 \text{ N}}$$

Rezultantna sila na zupčanicima:

$$F_1 = \sqrt{F_{t1}^2 + F_{r1}^2} \qquad F_2 = \sqrt{F_{t2}^2 + F_{r2}^2}$$

$$F_1 = \sqrt{2314^2 + 842^2} \qquad F_2 = \sqrt{2200^2 + 801^2}$$

$$F_1 = \mathbf{2462 \text{ N}} \qquad F_2 = \mathbf{2341 \text{ N}}$$

S obzirom da su ležajevi jednako udaljeni od središta zupčanika svaki od njih trpi jednaku silu:

$$F_{A1} = F_{B1} = \frac{F_1}{2} \qquad F_{A2} = F_{B2} = \frac{F_2}{2}$$

$$F_{A1} = F_{B1} = \frac{2462}{2} \qquad F_{A2} = F_{B2} = \frac{2341}{2}$$

$$F_{A1} = F_{B1} = \mathbf{1231 \text{ N}} \qquad F_{A2} = F_{B2} = \mathbf{1171 \text{ N}}$$

2.3 Proračun vratila

2.3.1 Preliminarni proračun vratila

Minimalni potrebni promjer vratila izračunat je pomoću izraza:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_n \cdot K_A \cdot S}{\pi \cdot R_{dt0}}} \quad (2.3)$$

Pri čemu je T_n - nazivni okretni moment, S - faktor sigurnosti u rasponu od 10 do 15 zbog zanemarivanja naprezanja uzrokovanih momentom savijanja kao i nepoznavanja konačnog oblika vratila, koncentracija naprezanja i površinske obrade. R_{dt0} - trajna ishodišna dinamička čvrstoća materija pri torziji. Očitano iz tablice [2]

Pogonsko vratilo

Za pogonsko vratilo uvrštavanjem u izraz (2.3) izračunati minimalni promjer je:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 121,5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 12}{\pi \cdot 260}}$$

$$d \geq 38,51 \text{ mm}$$

Prema tablici[1] standardnih dimenzija krajeva cilindričnog vratila prema normi DIN 748 usvojena je dimenzija **40x110 DIN 748** ($\phi 40k6$). Maksimalni radijus prijelaza je $r_{max} = 1 \text{ mm}$.

Prema tablici standardnih dimenzija uložnih pera[1] po DIN 6885 normi usvojeno je pero **DIN6885 – A12 × 8 × 100 – E295** s dubinom utora u vratilu $t_1 = 5 \text{ mm}$ i utorom u glavini $t_2 = 3,3 \text{ mm}$.

Promjer na poziciji ležaja $d_L = d + 5 \text{ mm} = \mathbf{45 \text{ mm}}$. Prema katalogu proizvođača ležajeva[3] odabran je ležaj **SKF 6008** s potrebnom dimenzijom oslonca ležaja $44,6 \text{ mm} \leq d_a \leq 49,25 \text{ mm}$ te je odabran **d_a = 48mm**.

Gonjeno vratilo

Za gonjeno vratilo uvrštavanjem u izraz (2.3) izračunati minimalni promjer je:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 462 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 11}{\pi \cdot 260}}$$

$$d \geq 58,39 \text{ mm}$$

Prema tablici[1] standardnih dimenzija krajeva cilindričnog vratila prema normi DIN 748 usvojena je dimenzija **60x140 DIN 748** ($\phi 60m6$). Maksimalni radijus prijelaza je $r_{max} = 1,6 \text{ mm}$.

Prema tablici standardnih dimenzija uložnih pera[1] po DIN 6885 normi usvojeno je pero **DIN6885 – A18 × 11 × 130 – E295** s dubinom utora u vratilu $t_1 = 7 \text{ mm}$ i utorom u glavini $t_2 = 4,4 \text{ mm}$.

Promjer na poziciji ležaja $d_L = d + 5 \text{ mm} = \mathbf{65 \text{ mm}}$. Prema katalogu proizvođača ležajeva[3] odabran je ležaj **SKF 31913** s potrebnom dimenzijom oslonca ležaja $73 \text{ mm} \leq d_a \leq 86 \text{ mm}$ te je odabran **d_a = 84mm**.

2.3.2 Kontrolni proračun vratila

2.4 Proračun steznog spoja

2.5 Proračun valjnih ležajeva

Trajnost ležajeva se može proračunati po izrazu

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{F} \cdot f_t \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (2.4)$$

pri čemu je C - dinamička nosivost ležaja, p - eksponent vijeka trajanja. Za kuglične ležajeve $p = 3$, za ostale $p = \frac{10}{3}$ i f_t - temperaturni faktor. Za $\vartheta < 150^\circ C \Rightarrow f_t = 1$.

Odabrani ležajevi za pogonsko vratilo imaju dinamičku nosivost $C = 17,8 \text{ kN}$. Uvršćavanje poznatih podataka u (2.4) dobije se minimalna trajnost ležaja

$$L_{10h1} = \left(\frac{17800}{1231} \cdot 1 \right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 1100}$$
$$L_{10h1} = \mathbf{45808 \text{ h}}$$

Odabrani ležaj zadovoljava potrebnu minimalnu trajnost iz zahtjeva.

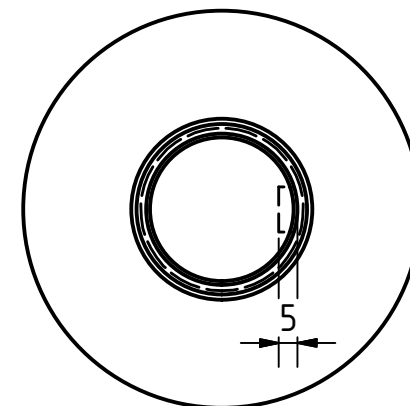
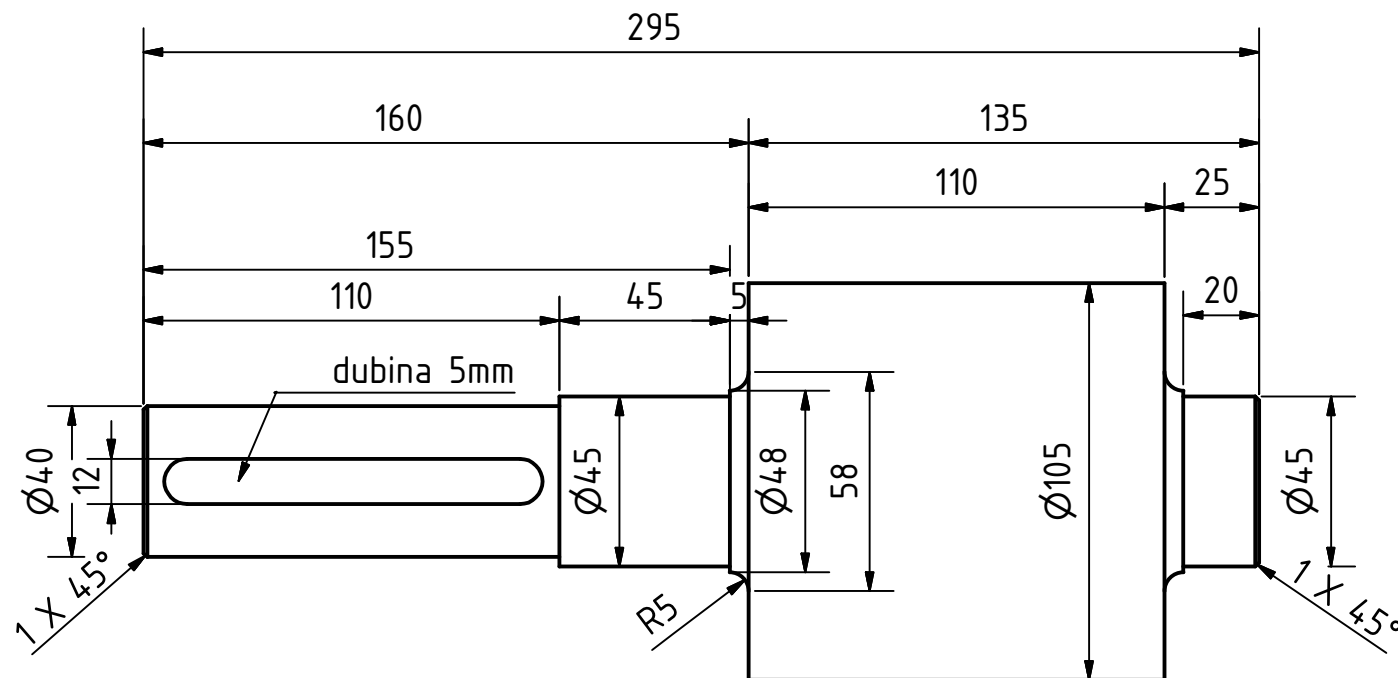
Odabrani ležajevi za gonjeno vratilo imaju dinamičku nosivost $C = 54,7 \text{ kN}$. Uvršćavanje poznatih podataka u (2.4) dobije se minimalna trajnost ležaja

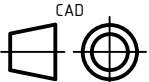
$$L_{10h2} = \left(\frac{54700}{1171} \cdot 1 \right)^{\frac{10}{3}} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 275}$$
$$L_{10h2} = \mathbf{22247650 \text{ h}}$$

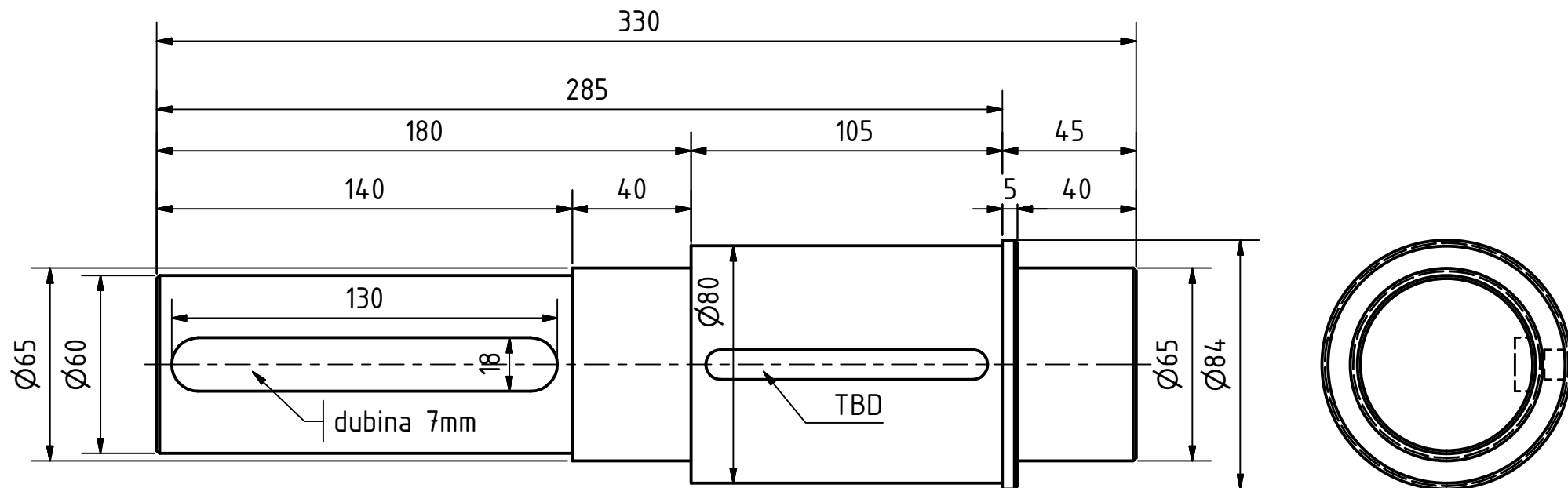
Odabrani ležaj zadovoljava potrebnu minimalnu trajnost iz zahtjeva.

Literatura

- [1] M. Jokić, *Zbirka potrebnih materijala i tablica za izradu timskog projektnog zadatka*. Politehnika Pula, 2018.
- [2] B. Križan, *Osnove proračuna i oblikovanja konstrukcijskih elemenata*. Školska knjiga, Zagreb, 2008.
- [3] SKF, “Product catalogue.” <http://www.skf.com/group/products/index.html> (27.10.2018), 2018.
- [4] B. Križan, *Interna skripta iz kolegija Elementi strojeva 2 za konstrukcijske vježbe*. Politehnika Pula, 2018.



Naziv dijela/sklopa: Pogonsko vratilo		Nacrt broj:		Revizija: 0.1		Predmet: Konstrukcije				
Materijal:		Masa:		Akad. god.: 2018./2019.		Semestar: V.				
				Program br.:		List:	Listova:			
CAD		Mjerilo: 1:2		Format: A4		Ime i prezime		Datum	Potpis	
		Netolerirane kote DIN 7168-m-S / DIN 7168-g-U		Politehnika Pula		Crtao		Kristijan Cetina		
						Pregledao				
						Odobrio				



Naziv dijela/sklopa: Gonjeno vratilo		Nacrt broj:		Revizija:		Predmet: Konstrukcije					
						Akad. god.: 2018./2019.		Semestar: V.			
Materijal:				Masa:		Program br.:		List:	Listova:		
						Ime i prezime		Datum			
						Potpis					
CAD		Mjerilo:		Format:		Politehnika Pula		Crtao			
				A4				Pregledao			
		Netolerirane kote DIN 7168-m-S / DIN 7168-g-U						Odobrio			