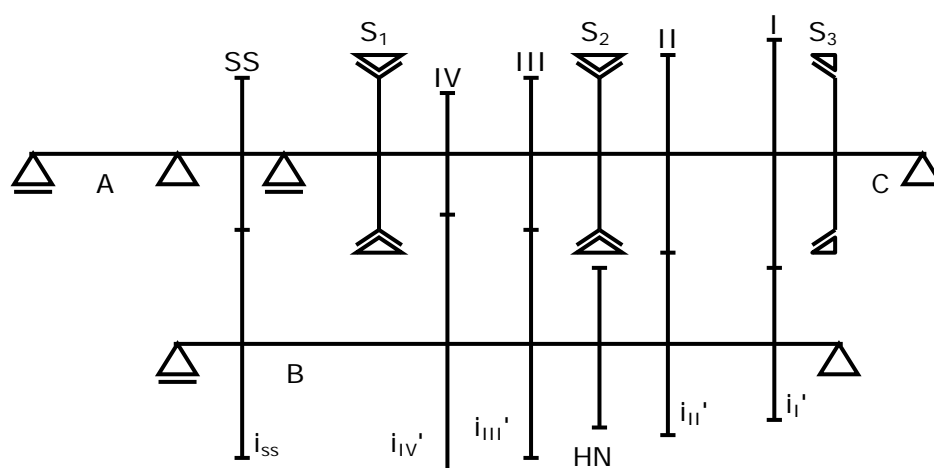


PRORAČUN MENJAČA**ZADATAK**

Za menjač sa tri vratila (šematski prikaz je dat na Slici 1.) polazni podaci su sledeći:

- putničko vozilo / namensko vozilo
 - $P_{emax} = 57 \text{ kW}$
 - $\omega_{ePemax} = 430 \text{ s}^{-1}$
 - $M_{emax} = 130 \text{ Nm}$
 - $\omega_{eMemax} = 262 \text{ s}^{-1}$
 - $\beta = 1.8$
 - $i_I = 4.50$
 - $i_{II} = 3.09$
 - $i_{III} = 2.12$
 - $i_{IV} = 1.46$
 - $i_V = 1$
- a) Definirati ulazne veličine (m_n , A , b , β) potrebne za definisanje geometrijskih parametara zupčanika (JUS M.C1.016), kao i specifične vrednosti neophodne za proveru čvrstoće zupčastih parova (na primeru zupčastog para koji odgovara III stepenu prenosa)
- b) Odrediti maksimalni radijalni ugib izlaznog vratila za slučaj uključenog III stepena prenosa



Slika 1.

S_1 , S_2 , S_3 - sinhro-spojnice (dve dvosmerne + jedna jednosmerna)
 A, B, C – vratila

a) U zadatku iz Projektovanja vozila definišu se brojevi zuba svakog zupčastog para. Neke od napomena su:

- m_n, β su isti za sve zupčaste parove (unifikacija alata + ekonomičnost u proizvodnji). Iz toga sledi da se proverava modula vrši za I stepen prenosa, pri čemu se bira da z_{1I} bude što manje (ali pod uslovom da nema podsecanja zuba);
- $z_{1I} + z_{2I} = z_{1II} + z_{2II} = z_{1III} + z_{2III} = z_{1IV} + z_{2IV} = const.$;
- $i_i = i_{ss} \cdot i_i'$ (za menjač sa tri vratila);
- pri svođenju prenosnih odnosa (iz Dinamike vozila) na odnos celih brojeva zuba pogonskog i gonjenog zupčanika, moraju se izvršiti male korekcije ulaznih vrednosti. Nužna je provera efekata ovih korekcija na postavljene zahteve (u_{max}, V_{max}, \dots), za šta je potrebna kompletna transmisija (i_o, i_{br}, r_d, \dots). Za dati primer usvajamo korekciju bez ove analize, s obzirom da bi ta analiza trebalo da bude predmet zadatka iz Projektovanja vozila.

$$i_{ss} = 42 / 23 = 1.83$$

$$z_1 + z_2 = 65 = const.$$

$$i_I' = z_{2I} / z_{1I} = 46 / 19 = 2.42 \quad i_I = i_I' \cdot i_{ss} = 4.42$$

$$i_{II}' = z_{2II} / z_{1II} = 41 / 24 = 1.71 \quad i_{II} = i_{II}' \cdot i_{ss} = 3.126$$

$$i_{III}' = z_{2III} / z_{1III} = 34 / 31 = 1.1 \quad i_{III} = i_{III}' \cdot i_{ss} = 2.01$$

$$i_{IV}' = z_{2IV} / z_{1IV} = 41 / 24 = 0.81 \quad i_{IV} = i_{IV}' \cdot i_{ss} = 1.47$$

$$i_V = 1 \text{ (nije uključen } i_{ss} \text{ s obzirom da se radi o direktnom stepenu prenosa)}$$

Napomena:

$i_{ss} \nearrow \Rightarrow i_i' \searrow \Rightarrow$ usvajanje z_{1I} postaje manje kritično sa stanovišta podsecanja
 $\Rightarrow A \searrow \Rightarrow$ kompaktnija konstrukcija

* **Izbor modula m_n**

Merodavan je moment nošenja M_n

$$M_n = M_{emax} \cdot i_I \cdot \eta = 130 \cdot 4.42 \cdot 0.97$$

$$M_n = 557.4 \text{ Nm}$$

Iz tabele (prema JUS M.C1.015) za datu vrednost momenta nošenja sledi $m_n = 2.5 \text{ mm}$.

* **Izbor međuosnog rastojanja A**

Na osnovu empirijskih izraza

$$A = 90 \text{ mm}$$

* **Ugao nagiba zubaca β**

Prema preporukama:

- za putnička vozila $\beta = 20 \div 30^\circ$
- za teretna i radna vozila $\beta = 25 \div 45^\circ$

usvajamo vrednost ugla nagiba zubaca $\beta = 24^\circ$.

Neophodeno je proveriti modul m_n , s obzirom da postoji međusobna zavisnost izračunatih veličina:

$$m_n = \frac{2 \cdot A \cdot \cos \beta}{z_{11} \cdot (i_1' + 1)} = \frac{2 \cdot 90 \cdot \cos 24^\circ}{19 \cdot (2.42 + 1)} = 2.53 \quad \Rightarrow \quad m_n = 2.5 \quad O.K.$$

To znači da je potvrđena usvojena tablična vrednost za date uslove.

* **Širina zuba b**

Direktno je vezana sa β zbog uslova da stepen zahteva $\varepsilon_a \geq 1$

$$b = 7 \div 8.5 \cdot m_n \quad \Rightarrow \quad b = 7.8 \cdot m_n \quad \Rightarrow \quad b = 19.5 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_a = \frac{b \cdot \sin \beta}{\pi \cdot m_n} = \frac{19.5 \cdot \sin 24^\circ}{\pi \cdot 2.5} = 1.0098 > 1 \quad \Rightarrow \quad b > 19.5 \text{ mm}$$

Sada možemo da definišemo sve geometrijske vrednosti zupčanika. Vezaćemo se za III stepen prenosa.

* **Ugao nagiba osnovne zupčaste letve (ugao profila)**

$$\operatorname{tg} \alpha_o = \frac{\operatorname{tg} \alpha_n}{\cos \beta} = \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\cos 24^\circ} \quad \Rightarrow \quad \alpha_o = 21.72^\circ \quad (\alpha_n = 20^\circ - \text{standardni profil})$$

* **Modul (svođenje kosih zuba na proračun pravih zuba)**

$$m = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{2.5}{\cos 24^\circ} = 2.736 \quad \Rightarrow \quad m = 2.75 \text{ mm} \quad (\text{standardna vrednost})$$

* **Prečnici podeonih krugova**

$$d_{o1III} = m \cdot z_{1III} = 2.75 \cdot 31 \quad \Rightarrow \quad d_{o1III} = 85.25 \text{ mm}$$

$$d_{o2III} = m \cdot z_{2III} = 2.75 \cdot 34 \quad \Rightarrow \quad d_{o2III} = 93.50 \text{ mm}$$

* **Prečnici osnovnih krugova**

$$d_{b1III} = d_{o1III} \cdot \cos \alpha_o = 85.25 \cdot \cos 21.72^\circ \Rightarrow d_{b1III} = 79.197 \text{ mm}$$

$$d_{b2III} = d_{o2III} \cdot \cos \alpha_o = 93.50 \cdot \cos 21.72^\circ \Rightarrow d_{b2III} = 86.862 \text{ mm}$$

* **Koeficijent pomeranja profila**

$$x_1 = 0.1158$$

$$x_2 = 0.1158$$

* **Ugao dodirnice**

$$\alpha = 22.698^\circ$$

* **Oсно растоjanje**

$$A = \frac{d_{o1III} + d_{o2III}}{2} \cdot \frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha} = 90.000046 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

* **Opterećenje zupčanika III stepena prenosa (sa Slike 1)**

Moment na posrednom vratilu (vratilo B) je merodavan:

- za statički proračun

$$M_{oB}' = M_{emax} \cdot \beta \cdot i_{ss} \cdot \eta_{ss} = 130 \cdot 1.8 \cdot 1.83 \cdot 0.98 \Rightarrow M_{oB}' = 419.6 \text{ Nm}$$

- za dinamički proračun

$$M_{oB}'' = M_{emax} \cdot i_{ss} \cdot \eta_{ss} = 130 \cdot 1.83 \cdot 0.98 \Rightarrow M_{oB}'' = 233.0 \text{ Nm}$$

Za III stepen prenosa kritičniji je pogonski zupčanik, jer je manji broj zubaca ($z_{1III} = 31$).

Napomena:

Savremena rešenja menjača sa tri vrtila zbog kompaktnosti konstrukcije često u IV stepenu prenosa (stepen prenosa naspram direktnom) imaju multiplikaciju:

$$i_{IV}' < 1 \quad ; \quad i_{IV}' = 0.81 \quad , \quad i_{ss} = 1.83 \quad \Rightarrow \quad i_{IV} = 1.47$$

Za ovakve slučajeve kritičniji je gonjeni zupčanik (jer je manji). Iz toga sledi da su opterećenja u kontaktu zubaca ista (akcija-reakcija), ali je učestanost promene - ciklusa veća.

* **Sile u kontaktu zubaca zupčanika III stepena prenosa**

Za statički proračun:

- proračun zubaca na savijanje;
- proračun vratila;
- ugib vratila (razmicanje)

$$F_{o1_{III}}' = \frac{2 \cdot M_{oB}'}{d_{o1_{III}}} = \frac{2 \cdot 419.6}{85.25 \cdot 10^{-3}} = 9845.3 \text{ N}$$

$$F_{r1_{III}}' = F_{o1_{III}}' \cdot \operatorname{tg} \alpha = 9845.3 \cdot \operatorname{tg} 22.698^\circ = 4118 \text{ N}$$

$$F_{a1_{III}}' = F_{o1_{III}}' \cdot \operatorname{tg} \beta = 9845.3 \cdot \operatorname{tg} 24^\circ = 4383 \text{ N}$$

Za dinamički proračun:

- proračun u korenu zubaca na savijanje;
- proračun površinske čvrstoće;
- proračun ležajeva

$$F_{o1_{III}}'' = \frac{2 \cdot M_{oB}''}{d_{o1_{III}}} = \frac{2 \cdot 233}{85.25 \cdot 10^{-3}} = 5466.3 \text{ N}$$

$$F_{r1_{III}}'' = F_{o1_{III}}'' \cdot \operatorname{tg} \alpha = 5466.3 \cdot \operatorname{tg} 22.698^\circ = 2286.4 \text{ N}$$

$$F_{a1_{III}}'' = F_{o1_{III}}'' \cdot \operatorname{tg} \beta = 5466.3 \cdot \operatorname{tg} 24^\circ = 2433.7 \text{ N}$$

Proračun se vrši prema uputstvu iz Mašinskih elemenata (postupak je dat i na predavanjima), uz dve napomene:

I Faktor neravnomernosti ulaznog momenta

$$K_A = \frac{M_{ekv}}{M_{nom}}$$

Najmanje vrednosti daju se za putnička vozila. Neravnomernost ulaza, koja se za klasične reduktore javlja u granicama $1.25 \div 1.50$ ovde se kod menjača vozila redukuje. Ova redukcija je najizraženija kod putničkih vozila, pošto se ona koriste uglavnom na režimima motora gde je $M_e < M_{emax}$.

$$K_{AF} = 0.80$$

$$K_{AH} = 0.65$$

Kod teretnih vozila i autobusa vrednosti su nešto veće

$$K_{AF} = 1.05$$

$$K_{AH} = 1.35$$

Kod radnih vozila

$$K_{AF} = 1.05$$

$$K_{AH} = 1.45$$

Ovde je bitno napomenuti da je rad na regulatorskoj karakteristici - izuzetno promenljiv moment i vrlo visoke vrednosti

II Faktor vremenske izdržljivosti

$$Z_{NT} = \sqrt[m]{\frac{N_{HD}}{n_s}}$$

N_{HD} - broj sprezanja zuba koji odgovara trajnoj dinamičkoj izdržljivosti modela

n_s - broj promena opterećenja u radnom veku

m - eksponent Velerove krive

$$N_{HD} = 2 \cdot 10^6 \div 10^9$$

$N_{HD} = 5 \cdot 10^7$ (uobičajena vrednost za zupčanike menjača od čelika za cementaciju)

$$m = 8.7 \div 13$$

$m = 13$ (za poboljšane i površinski otvrdnute čelike zupčanika menjača)

$$S_{III} = p_{III} \cdot S = 2 \cdot r_d \cdot \pi \cdot \frac{N_{III}}{i_{III}' \cdot i_o \cdot (i_{br})}$$

$$\Rightarrow n_s = N_{III} = \frac{S_{III} \cdot i_{III}' \cdot i_o \cdot (i_{br})}{2 \cdot r_d \cdot \pi}$$

Pri tome pokazati na šemi da smo došli do manjeg (pogonskog) zupčanika u zupčastom paru III stepena prenosa.

Dalje sve ide direktno prema Mašinskim elementima.

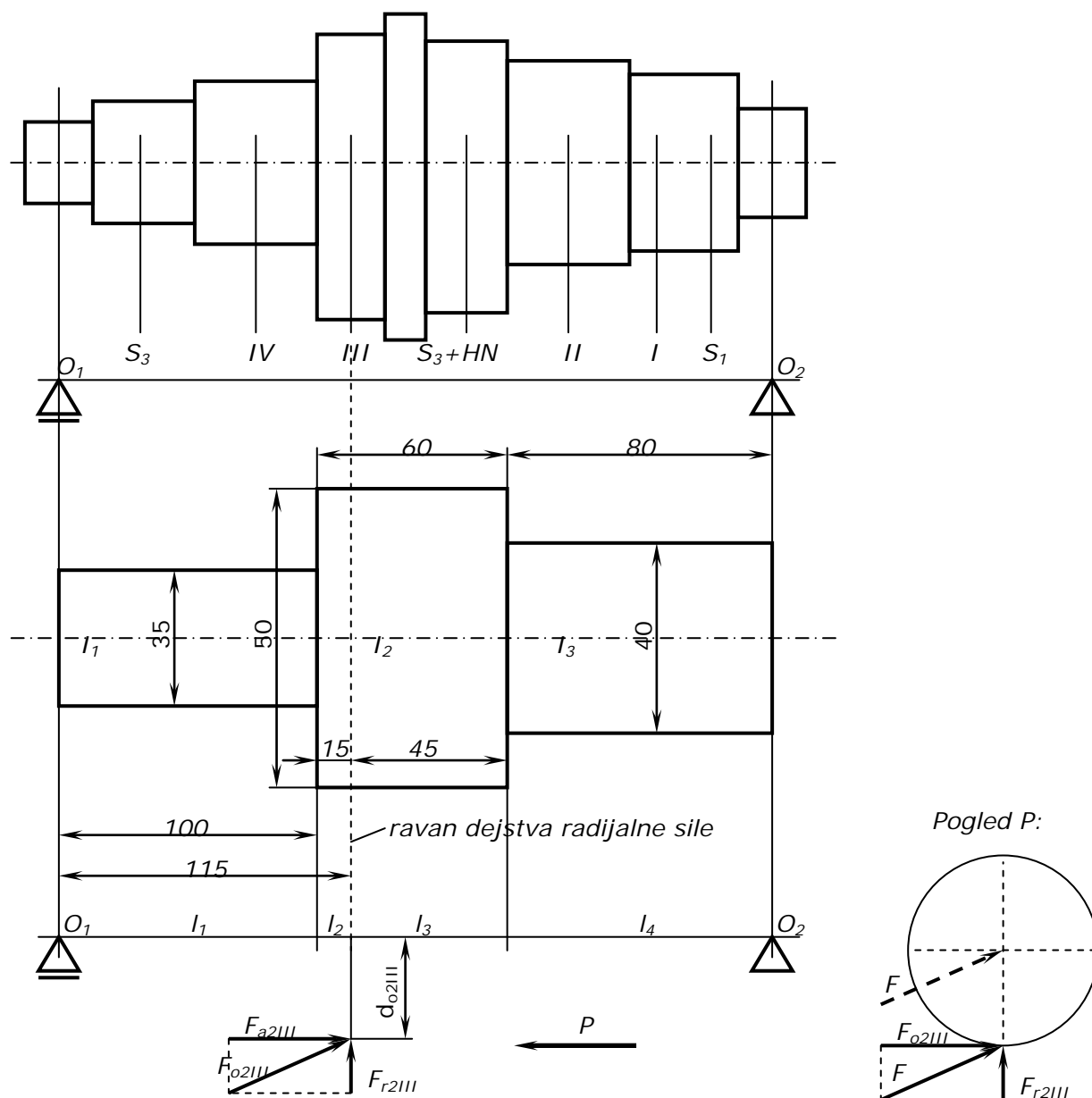
b) Određivanje maksimalnog radijalnog ugiba izlaznog vratila za III stepen prenosa

$$d_{max} = 0.55 \cdot A = 49.5 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad d_{max} = 50 \text{ mm}$$

Potrebno je osmisлити celokupno vratilo (montaža, položaj sinhro-spojnice, hoda unazad, ..)

Pojednostavljenja:

- objedinjujemo bliske prečnike;
- zanemarujemo redukciju prečnika nad osloncima (u uležištenju)



Statika:

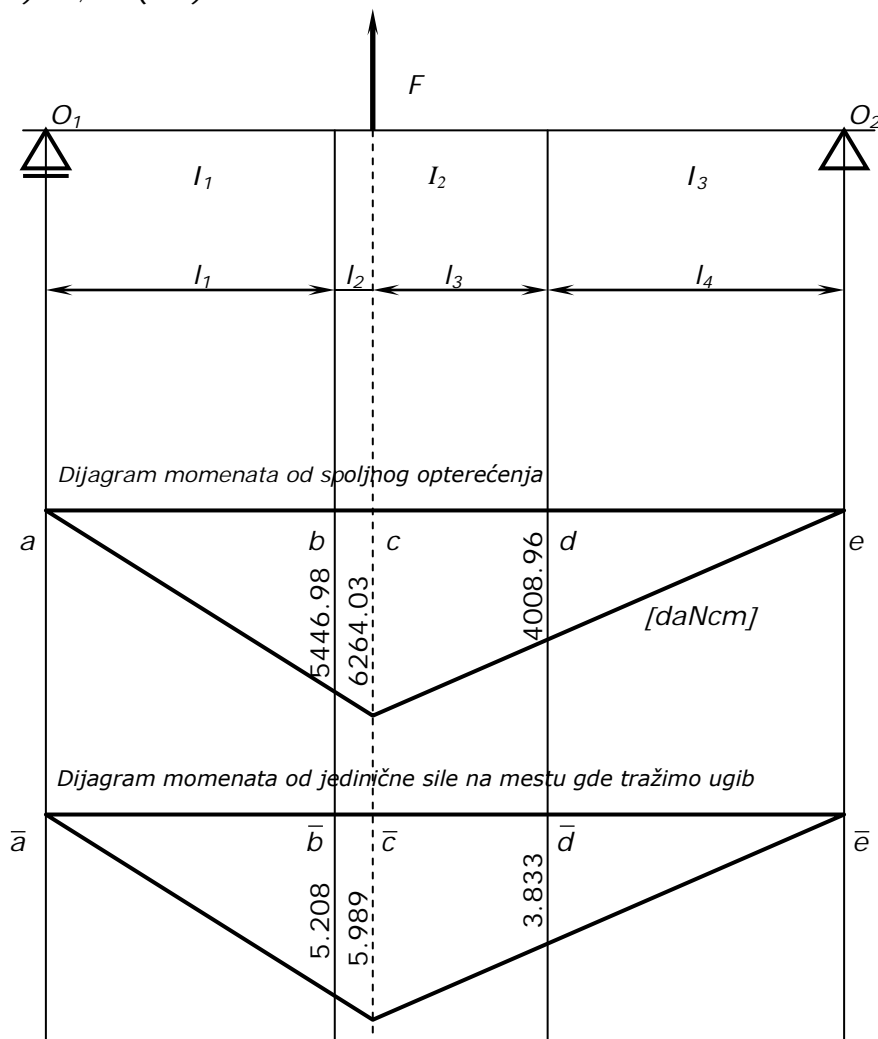
$$F_{o2III} = F_{o1III}' \cdot \eta_{III} = 9845.3 \cdot 0.98 \Rightarrow F_{o2III} = 9648 \text{ N}$$

$$F_{r2III} = F_{r1III}' \cdot \eta_{III} = 4118.0 \cdot 0.98 \Rightarrow F_{r2III} = 4036 \text{ N}$$

Zanemarivanja:

- zanemarujemo uticaj aksijalne sile i njenog momenta na radialni ugib;
- zanemarujemo moment uvijanja

F (daN) ; I (cm)



Usvaja se bazni presek:

$$I_c = I_1 = \frac{d_1^4 \cdot \pi}{64} ; I_c = 7.36 \text{ cm}^4$$

$$E = 2.1 \cdot 10^6 \text{ daN/cm}^2$$

Redukovane dužine:

$$l_1' = l_1 \cdot \frac{I_c}{I_1} = l_1 \cdot \frac{I_1}{I_1} = l_1 = 10$$

$$l_2' = l_2 \cdot \frac{I_c}{I_2} = l_2 \cdot \left(\frac{d_c}{d_2} \right)^4 = 0.36$$

$$l_3' = l_3 \cdot \frac{I_c}{I_3} = l_3 \cdot \left(\frac{d_c}{d_3} \right)^4 = 1.08$$

$$l_4' = l_4 \cdot \frac{I_c}{I_4} = l_4 \cdot \left(\frac{d_c}{d_4} \right)^4 = 4.689$$

$$F = \sqrt{F_{o_{2III}}^2 + F_{r_{2III}}^2}$$

$$F = 1045.82 \text{ daN}$$

Vereščaginov postupak množenja dijagrama (postoje tablice za množenje):

$$E \cdot I_c \cdot \delta = \frac{l_1'}{3} \cdot b \cdot \bar{b} + \frac{l_2'}{6} [b(2\bar{b} + \bar{c}) + c(\bar{b} + 2\bar{c})] + \frac{l_3'}{6} [c(2\bar{c} + \bar{d}) + d(\bar{c} + 2\bar{d})] + \frac{l_4'}{3} \cdot d \cdot \bar{d}$$

$$E \cdot I_c \cdot \delta = \frac{10}{3} \cdot 5446.98 \cdot 5.208 +$$

$$+ \frac{0.36}{6} \cdot [5446.98 \cdot (2 \cdot 5.208 + 5.989) + 6264.03 \cdot (5.208 + 2 \cdot 5.989)] +$$

$$+ \frac{1.080}{6} \cdot [6264.03 \cdot (2 \cdot 5.989 + 3.833) + 4008.96 \cdot (5.989 + 2 \cdot 3.833)] +$$

$$+ \frac{4.689}{3} \cdot 4008.96 \cdot 3.833$$

$$E \cdot I_c \cdot \delta = 158078.775 \text{ daN} / \text{cm}^2$$

$$\delta = \frac{158078.775}{E \cdot I_c} = \frac{158078.775}{2.1 \cdot 10^6 \cdot 7.36}$$

$$\delta = 0.01 \text{ cm} = 0.1 \text{ mm}$$

$$\delta < 0.15 \text{ mm} \Rightarrow \textbf{\underline{zadovoljen kriterijum}}$$

NAPOMENA 1: Potpuna analogija i za drugo vratilo na mestu III stepena prenosa

NAPOMENA 2: Može se zanemariti uticaj stalno spregnutog para, pošto je on direktno uz oslonac \Rightarrow radijalna sila se direktno prenosi na oslonac