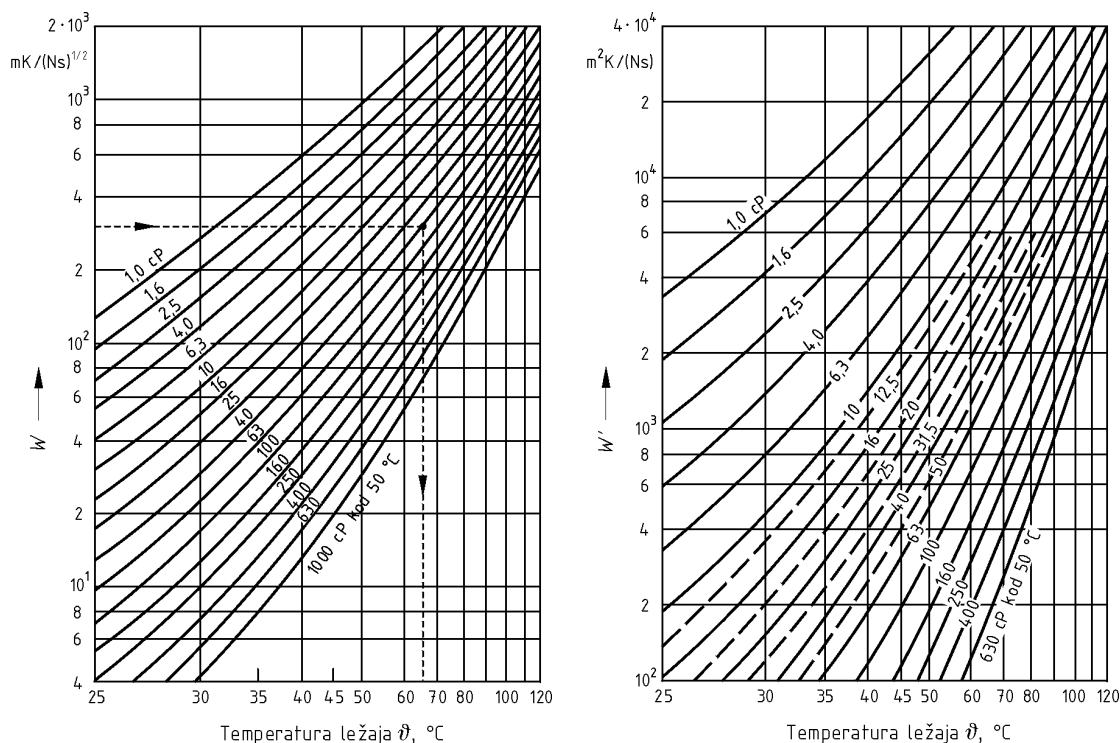


1. Primjer proračuna radijalnog kliznog ležaja (prema Niemannu)

Treba proračunati izlazni ležaj nekakvog prijenosnika čije vratilo prenosi snagu od 6000 kW vrteći se sa 300 1/min. Konstruktivno je poznato:

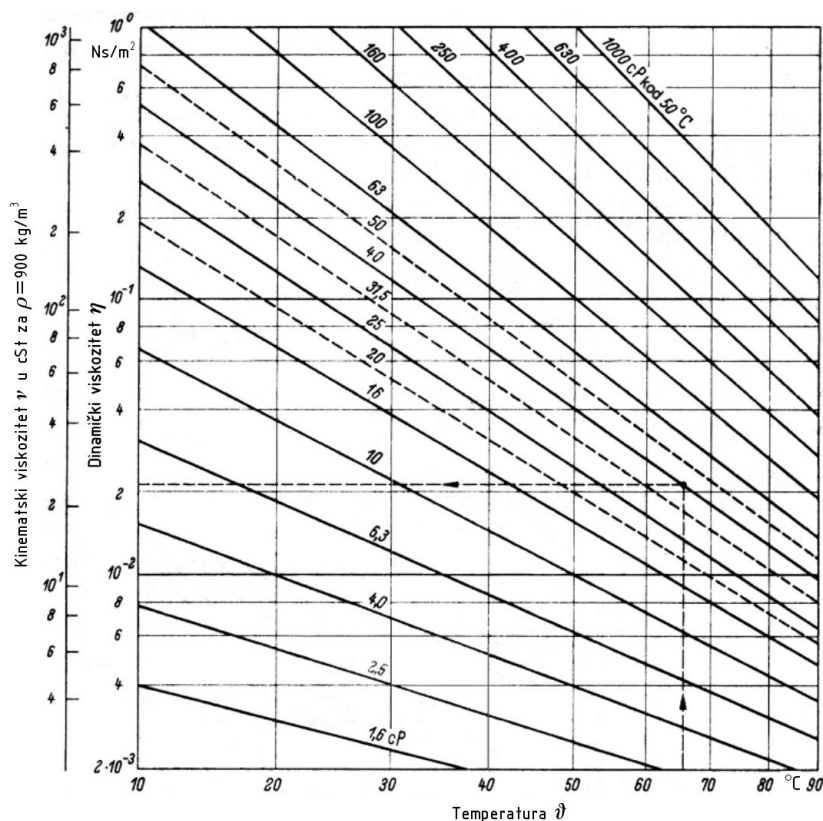
- $d=300$ mm – promjer rukavca
- $F=95000$ N – radijalna sila u ležaju
- $\eta=40$ cP kod 50°C – viskoznost maziva (1 cP=Pas/1000)
- $\vartheta_0=20^{\circ}\text{C}$ – temperatura okoline
- Materijal rukavca: čelik
- Materijal ležaja: Bijela kovina (WM 10)

- a) Sa $\varphi=0,8$ (omjer širina/promjer), $b=\varphi \cdot d=240$ mm=0,24 m
- b) $p=F/(b \cdot d)=95.000/(30 \cdot 24)=132$ N/cm²= $1,32 \cdot 10^6$ N/m², a kako je za WM $p_{\text{dop}}=100 \dots 300$ N/cm² to srednji specifični pritisak zadovoljava (uobičajena oznaka u literaturi je \bar{p} , a u ovom je primjeru, radi jednostavnosti, uzeta oznaka p).
- c) $\omega=2\pi n=31,4$ s⁻¹ i $u=0,5\omega d=0,5 \cdot 31,4 \cdot 0,3=4,7$ m/s (obodna brzina)
 Za $\vartheta \approx 60^{\circ}\text{C}$ $\eta=0,026$ Ns/m² i $\psi \approx 1 \cdot 10^{-3}$ računamo
 $So=p\psi^2/(\eta\omega)=1,32 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}/(0,026 \cdot 31,4) \approx 1,5$, dakle: **So > 1**
- d) Faktor zagrijavanja $W=30V \sqrt{pn^3}/(\alpha^* \cdot A)$
 $V=0,25\pi \cdot d^2 \cdot b=0,0169$ m³,
 $\alpha^*=20$ Nm/(m² sK), $A=15bd=1,08$ m², dobije se:
 $W=30 \cdot 0,0169 \cdot \sqrt{1,32 \cdot 10^6 \cdot 5^3}/(20 \cdot 1,08)=302$ mK/(Ns)^{1/2}
- e) Sa slike 1. (lijevo) očitavamo $\vartheta=66^{\circ}\text{C}$



Slika 1. Faktor zagrijavanja za $So>1$ (lijevo) i $So<1$ (desno) za $\vartheta_0=20^{\circ}\text{C}$

f) Dinamički viskozitet $\eta = [(\vartheta - \vartheta_0)/W]^2 = 0,023 \text{ Ns/m}^2 = 23 \text{ cP}$ ili sa slike 2., za $\vartheta = 66^\circ\text{C}$



Slika 2.

g) Određivanje ψ :

$$\text{Sa } Y = \frac{\eta n}{\bar{\rho}} \frac{2\varphi}{1+\varphi} = \frac{0,023 \cdot 5}{1,32 \cdot 10^6} \cdot \frac{2 \cdot 0,8}{1+0,8} = 7,7 \cdot 10^{-8}$$

i za $\delta = 0,3$ sa slike 3. (desno) se dobije

$$\psi = 0,9 \cdot 10^{-3},$$

$$\delta = 0,3 < \varphi/(1+\varphi) = 0,44$$

h)
$$So = \frac{\rho \psi^2}{\eta \omega} = \frac{1,32 \cdot 10^6 \cdot 0,9^2 \cdot 10^{-6}}{0,023 \cdot 31,4} = 1,48 > 1$$

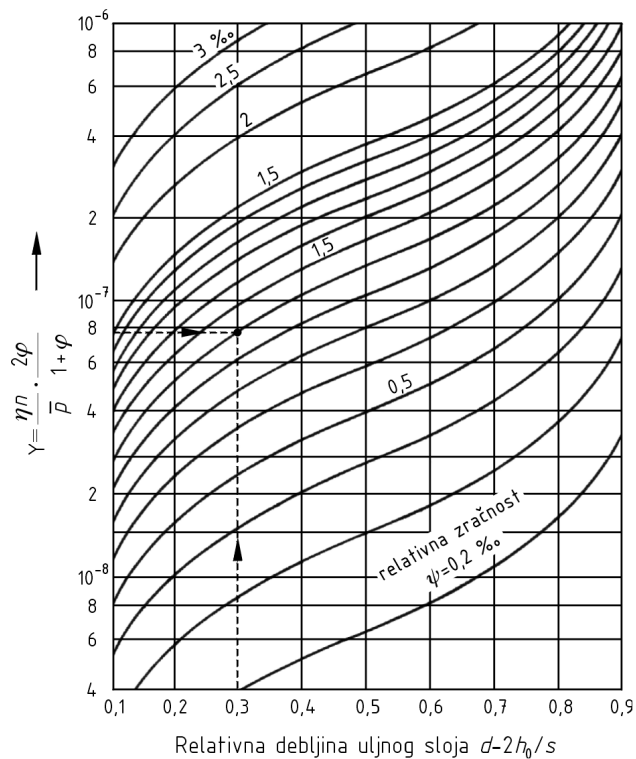
i) Izradbena relativna zračnost je

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \psi + \alpha_w(\vartheta - \vartheta_0) - 0,7\alpha_L(\vartheta - \vartheta_0) \\ &= 0,9 \cdot 10^{-3} + 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 46 - 0,7 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \cdot 46 \\ &= 1,05 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

pa je $s_0 = \psi_0 \cdot d = 0,315 \text{ mm}$

j) Faktor trenja je

$$\begin{aligned} \mu &= 3\psi / \sqrt{So} = 3 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} / \sqrt{1,48} \\ &= 0,00221 = 2,21 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$



Slika 3.

k) Snaga trenja $P_R = F \cdot \mu \cdot \pi \cdot d \cdot n = 95 \cdot 10^3 \cdot 2,21 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 5 = 989 \text{ Nm/s} = 0,989 \text{ kW}$ ili preko $P_R = \Phi \cdot \sqrt{\eta}$, gdje je $\Phi = 30V \sqrt{pn^3}$.

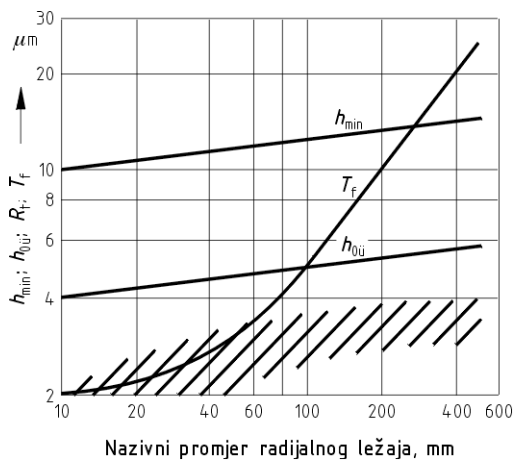
l) Minimalna debljina uljnog filma kod pogonske brzine vrtnje $h_0 = \delta \cdot \psi \cdot d/2 = 0,3 \cdot 0,9 \cdot 10^3 \cdot 0,3/2 = 0,040 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

m) Prijelazni broj okretaja

$$n_{\ddot{u}} = h_{0\ddot{u}} \cdot n / h_0 = 5,3 \cdot 10^{-6} \cdot 5 / (0,04 \cdot 10^{-3}) = 0,66 \text{ 1/s}$$

$$n_{\min} = h_{\min} \cdot n / h_0 = 13 \cdot 10^{-6} \cdot 5 / (0,04 \cdot 10^{-3}) = 1,62 \text{ 1/s} = 97,2 \text{ 1/min}$$

Za $h_{0\ddot{u}}$ i h_{\min} prema slici 4. iznose $R_t = 3 \dots 4 \mu\text{m}$ i $T_f = 15 \mu\text{m}$



Slika 4.

n) Protok ulja

$$Q_S = 0,75 \cdot h_0 \cdot b \cdot \pi \cdot d \cdot n = 0,75 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3} \cdot 0,24 \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 5 = 0,0339 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 2,03 \text{ lit/min}$$

o) Hertzov pritisak

$$p_H = 0,591 \sqrt{E p \psi} = 0,591 \sqrt{8 \cdot 10^{10} \cdot 1,32 \cdot 10^6 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}} = 5,76 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 5,76 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{uz } E = 2 E_L E_W / (E_L + E_W) = 2 \cdot 5 \cdot 10^{10} \cdot 21 \cdot 10^{10} / (5 \cdot 10^{10} + 21 \cdot 10^{10}) = 8 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

za WM 10. $p_H < 0,2 \cdot \sigma_{dF} = 11,4$ ($\sigma_{dF} = 57 \text{ N/mm}^2$, DIN 2203).

2. Primjer proračuna aksijalnog kliznog ležaja (prema Niemannu)

Treba proračunati aksijalni klizni ležaj vodne turbine sa nagibnim segmentima koji je opterećen aksijalnom silom $F=3,2 \cdot 10^6$ N. Broj okretaja ležaja je 3,13 1/s. Ležaj se podmazuje optočnim sistemom s uljem koje ima $\eta=31.5$ cP kod 50°C . Materijal ležaja je bijela kovina

Za bijelu kovinu je srednja vrijednost dopuštenog pritiska:

$$p \approx 300 \text{ N/cm}^2 = 3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2.$$

Konstruktivno odabiremo $i=12$ segmenata sa odnosom $l/L=0.8$.

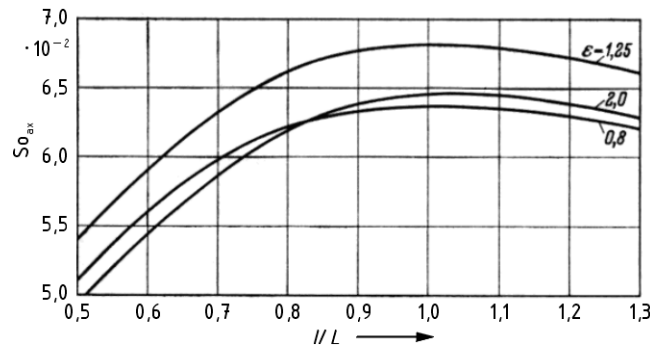
$$l = \sqrt{F \cdot (l/L) / (p \cdot i)} = \sqrt{3,2 \cdot 10^6 \cdot 0,8 / (3 \cdot 10^6 \cdot 12)} = 0,267 \text{ m} \text{ pa je } L=0.333 \text{ m}.$$

Srednji je promjer ležaja $d_m = i \cdot l / (\pi \cdot 0,8) = 1,275 \text{ m}$, a vanjski i unutarnji promjeri su:

$$d_a = d_m + b = 1,608 \text{ m}.$$

$$d_i = d_m - b = 0,942 \text{ m}.$$

Za odabrani $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = 1,25$ i $l/L=0.8$ dobije se sa slike 5. $So_{ax}=0,066$.



Slika 5.

Obodna je brzina $u = \pi d_m n = \pi \cdot 1,275 \cdot 3,13 = 12,53 \text{ m/s}$.

Faktor zagrijavanja je:

$$W_{ax} = 3 \cdot u \sqrt{F \cdot u \cdot i \cdot l} / (\alpha^* \cdot A) =$$

$$= 3 \cdot 12,53 \sqrt{3,2 \cdot 10^6 \cdot 12,53 \cdot 12 \cdot 0,267} / (20 \cdot 15 \cdot 0,333 \cdot 1,275)$$

$$= 3345 \text{ mK} / (\text{Ns})^{1/2}$$

uz $\alpha^* = 20 \text{ Nm}/(\text{m}^2\text{sK})$ i $A \approx 15 \cdot b \cdot d_m$.

Za izračunati faktor zagrijavanja bila bi temperatura previsoka (vidi sliku 1. u prethodnom zadatku) pa se uzima da će, uz predviđeno cirkulacijsko podmazivanje, ona biti 60°C . Stoga je dinamički viskozitet

$$\eta = 0,02 \text{ Ns/m}^2 = 20 \text{ cP} \text{ (kod } 60^\circ\text{C)}.$$

Potrebna količina ulja za podmazivanje (ujedno i za hlađenje) iznosi:

$$Q_K = P_R / (1670 \cdot 10^3 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)) = 6,0 \cdot 10^4 / (1670 \cdot 10^3 \cdot 10) = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s},$$

gdje je

$$1670 \cdot 10^3 = c\rho,$$

$$P_R = \Phi_{ax} \sqrt{\eta} = 3u \sqrt{F \cdot u \cdot i \cdot l} \sqrt{\eta} = 60 \text{ kW} \quad \text{uz} \quad \Delta\vartheta_1 = 10 \text{ K.}$$

Najmanja debljina uljnog sloja je:

$$h_0 = \sqrt{S_{o_{ax}} \cdot \eta \cdot u \cdot L / p} = \sqrt{0,066 \cdot 0,02 \cdot 12,53 \cdot 0,333 / 3 \cdot 10^6} = 42,8 \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

Protok ulja za podmazivanje:

$$Q_s = 0,7 \cdot b \cdot h_0 \cdot u \cdot i = 0,7 \cdot 0,333 \cdot 42,8 \cdot 10^{-6} \cdot 12,53 \cdot 12 = 1,50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} < Q_K,$$

čime je zadovoljen i kriterij hlađenja i podmazivanja.

Prijelazno opterećenje je:

$$F_{\ddot{u}} = 9,6 \cdot 10^8 \cdot \eta \cdot b^2 \cdot d_m \cdot n = 9,6 \cdot 10^8 \cdot 0,02 \cdot 0,333^2 \cdot 1,275 \cdot 3,13 = 8,5 \cdot 10^6$$

$$F_{\ddot{u}} / F = n / n_{\ddot{u}} = 2,6.$$

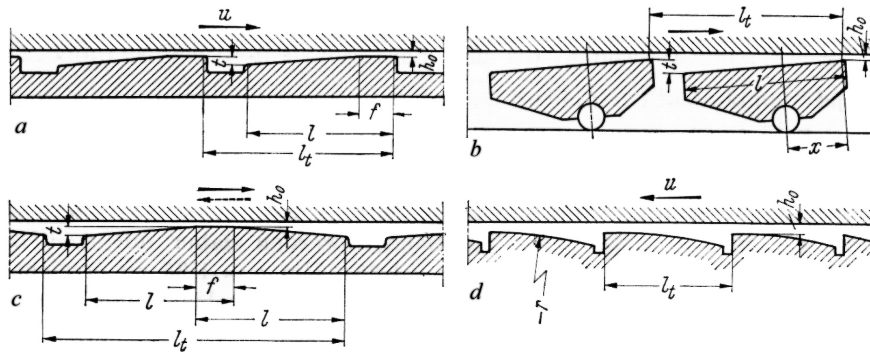
Položaj oslonaca nagibnih segmenata ležaja:

$$x = 0,42 \cdot l \cdot d_s / d_m = 0,42 \cdot 0,267 \cdot 1,318 / 1,275 = 0,115 \text{ m} \quad (\text{udaljenost od izlazne strane), na promjeru:}$$

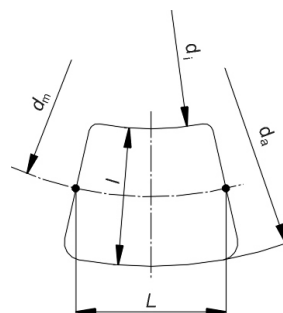
$$d_s = \sqrt{0,5(d_a^2 + d_i^2)} = \sqrt{0,5(1,608^2 + 0,942^2)} = 1,318 \text{ m.}$$

Debljina je segmenata:

$$h_{\text{seg}} = 0,25 \sqrt{b^2 + l^2} = 0,106 \text{ m.}$$



Slika 6



Slika 7