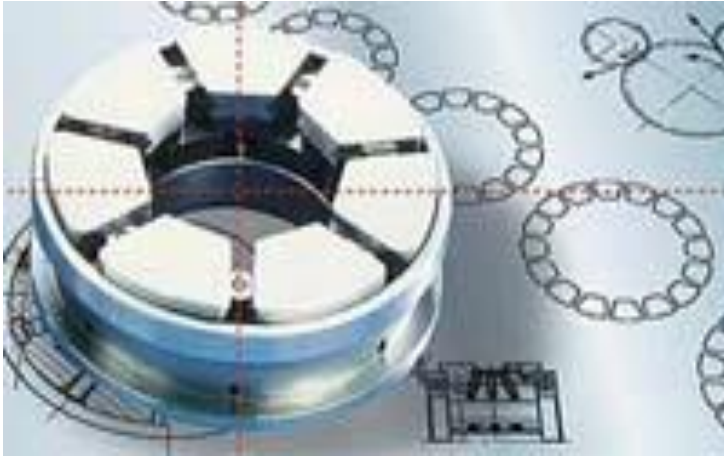


AXIÁLNÍ KLUZNÁ LOŽISKA



Složení: segmenty a běhoun

Nejčastější použití: závěsná ložiska vodních turbín s vertikální osou

Zachycují síly: hmotnost rotorů
svislý tah oběžného kola

Typ zatížení: stacionární (časově neproměnné)



Ložiska s kapalinným třením, ztráty minimální, nutná dokonalá obsluha ložiska (dodávka maziva).
Reynoldsova ložisková rovnice

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot (U_1 - U_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$$

nekonečně široké ložisko
derivate dle z nulové

Reynoldsova rovnice je prostředkem pro stanovení rozložení rychlostí ve spáře ložiska. Předpokladem je laminární proudění a konstantní teplota (a viskozita) ve spáře. Řešením Reynoldsovy rovnice je rozložení tlaku podél spáry $p(x,z)$. Znamé dp/dx umožní určit rychlost.

Výslednice rozložení tlaku dává sílu F , kterou může být kluzná plocha zatížena. Z rozložení rychlostí vyplývá průtok maziva spárou ložiska Q .

Z rozložení rychlostí plyne i rozložení tečného napětí τ .

Tečné napětí v mazivu na povrchu pohybující se kluzné plochy dává v sumaci odpor proti pohybu F_t , a tím také ztrátový výkon P_{ztr} měnící se v teplo.

Tepelná bilance sumarizuje teplo vznikající a odváděné a lze z ní upravit závislost viskozity ve spáře ložiska na teplotě maziva $\eta - T$.

Použité mazivo má svou vlastní závislost viskozity na teplotě. Společným řešením obou závislostí Viskozity na teplotě se stanoví stav ložiska – teplota maziva, viskozita, tloušťka spáry, průtok maziva, odpor, ztráty pro zadané podmínky (zatížení, geometrie, mazivo a jeho vlastnosti, odvod tepla aj.).

Řešení je založeno na použití grafů nebo aproximačních funkcí (mocninné řady).

Ačkoliv se ložisko chová jako pružina, nelze přímo stanovit samostatně se ustavivší tloušťku spáry,

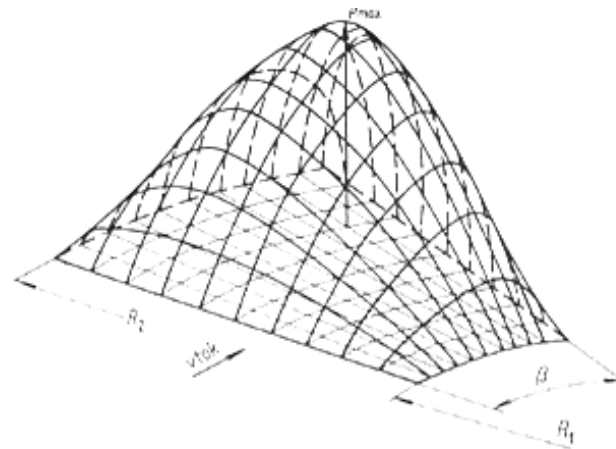
ale je nutné zvolit tloušťku spáry a pro ni

určit výslednici tlaku – tedy zatížení.

K zadanému zatížení (viskozita fce T)

se lze **postupně přibližovat**.

tlakové pole segmentu ložiska

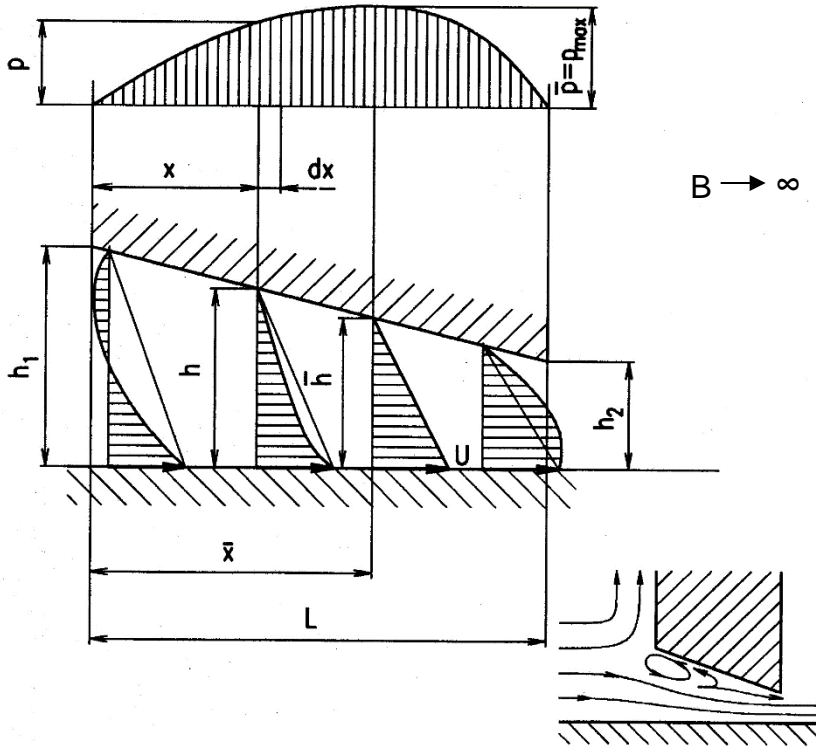


Obr. 3.3.1. Průběh hydrodynamického tlaku na segmentu

α je malý a platí $\text{tg } \alpha \approx \alpha$, $dx = -dh/\alpha$ výraz

$$dp = \frac{6 \cdot \eta \cdot U}{\alpha} \cdot \left(\frac{\bar{h}}{h^3} - \frac{1}{h^2} \right) \cdot dh \quad (4.26)$$

$$h = h_2 + (L - x) \cdot \text{tg } \alpha \quad \text{pro } dp/dx = 0 \quad h = \bar{h}$$



Obr.4.7 Rychlost a tlak ve spáře axiálního ložiska

Integrací podle h a dosazením okrajových podmínek pro určení integračních konstant (pro $x=0$ je $h=h_1$, pro $x=L$ je $h=h_2$) se získá průběh rozložení tlaku mezi kluznými plochami

$$p = \frac{6 \cdot \eta \cdot U}{\alpha \cdot h^2} \cdot \frac{(h_1 - h) \cdot (h - h_2)}{(h_1 + h_2)} \quad (4.27)$$

Axiální hydrodynamicky mazaná ložiska

V místě maximálního tlaku $\bar{x} = L \cdot h_1 / (h_1 + h_2)$ je $\bar{h} = 2 \cdot h_1 \cdot h_2 / (h_1 + h_2)$. Rozložení tlaku se uvádí v bezrozměrných souřadnicích $\xi = (L - x)/L$ a výsledky se zjednoduší zavedením poměru $m = h_2 / (h_1 - h_2)$. Někdy bývá místo m používán poměr maximální a minimální tloušťky spáry h_1/h_2 .

Rozložení tlaku po délce segmentu dává funkci, jejíž integrací lze stanovit výslednici, sílu na jeden segment. Lze odvodit, že největší výslednici F dává poměr $m=0,841$. Dělením výslednice plochou průmětu segmentu se získá střední tlak na segmentu $p_s = F/(B \cdot L)$. Bezrozměrný poměr

$$So_\infty = \frac{p_s \cdot h_2^2}{6 \cdot \eta \cdot U \cdot L} = K_{F_\infty} \quad (4.28)$$

se označuje jako ložiskové nebo Sommerfeldovo číslo nebo charakteristické číslo ložiska (v literatuře se někdy takto označuje i šestinásobek výše uvedené veličiny nebo převrácená hodnota). Index ∞ značí odvození pro nekonečnou šířku B . Součinitel K_{F_∞} je pouze funkcí poměru m a je dán výrazem

$$K_{F_\infty} = m^2 \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{m} \right) - \frac{2 \cdot m^2}{1 + 2 \cdot m} \quad (4.29)$$

Vzhledem ke složitosti výrazu pro rozložení tlaku je zřejmé, že integrací získaný výraz pro výslednici F neumožní přímý výpočet minimální tloušťky spáry h_2 z velikosti zatížení F . Proto se postupuje tak, že se volí minimální tloušťka spáry h_2 a poměr m a pomocí nich se určí velikost výslednice F . Postupným opakováním pro změněné h_2 se určí výslednice tlaku shodná se zatížením F a jí odpovídající h_2 a m . Postup se zjednoduší pomocí vynesení závislosti ložiskového čísla So na poměru m , obr.4.8. Ložiskové číslo So představuje bezrozměrnou výslednici rozložení tlaku na segment resp. bezrozměrný střední tlak.

Pro velký průměr kluzných ploch $D \rightarrow \infty$ je případ převeden na přímočarý pohyb a obdélníkový segment. Řešení se zjednoduší pro nekonečně široký segment $B \rightarrow \infty$. Pro tloušťku spáry platí $h = h_1 - x \cdot \operatorname{tg} \alpha$, takže $dh = -\alpha \cdot dx$ a Reynoldsova rovnice se zjednoduší na výraz

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \right) = 6 \cdot U \cdot \frac{dh}{dx} \quad \text{a po integraci na} \quad \frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} = 6 \cdot U \cdot h + C_1$$

Po separaci proměnných a získání integrační konstanty C_1 z podmínky pro maximální tlak $dp/dx = 0$, tj. pro místo maximálního tlaku zavedeme označení pruhem $x = \bar{x}$ a $h = \bar{h}$, takže platí $C_1 = -6 \cdot U \cdot \bar{h}$ a pro rozložení tlaku

$$dp = \frac{\eta}{h^3} \cdot (6 \cdot U \cdot h + C_1) \cdot \frac{(-1)}{\alpha} \cdot dh = \frac{6 \cdot U \cdot \eta}{\alpha} \cdot \left(\frac{\bar{h}}{h^3} - \frac{1}{h^2} \right) \cdot dh$$

a po integraci

$$p = 6 \cdot U \cdot \eta \cdot \frac{L}{(h_1 - h_2)} \cdot \left(\frac{1}{h} + \frac{C_1}{12 \cdot U \cdot h^2} \right) + C_2$$

resp. $h_1 - h_2 = \alpha \cdot L$, $h = h_1 - x \cdot \alpha$, meze pro x jsou od 0 do L , také lze $h = h_2 + (L - x) \cdot \alpha$, tlak $p=0$ je na okrajích, kde $h=h_1$ a h_2 resp. $x=0$ a L

a je možno získat rozložení tlaku podle souřadnice x , tj. funkci $p(x)$. Napřed ovšem je třeba zjistit hodnotu \bar{h} resp. \bar{x} . Dosazením za h lze získat výraz pro $p(x)$, kde integrační konstanty C_1 a C_2 plynou z okrajových podmínek pro $p=0$. Platí $h = h_1 - \alpha \cdot x$ a také $h_1 = h_2 + \alpha \cdot L$ a tak je

$$p(x) = \frac{6 \cdot U \cdot \eta \cdot L}{(h_1 - h_2)} \cdot \left(\frac{1}{(h_1 - \alpha \cdot x)} + \frac{C_1}{12 \cdot U \cdot (h_1 - \alpha \cdot x)^2} \right) + C_2$$

Po dosazení $x=0$ a $x=L$ se stanoví C_1 a C_2 , jednodušší postup použije funkci $p(h)$ a meze h_1 a h_2 .

Po úpravě platí pro $\bar{h} = 2 \cdot h_1 \cdot h_2 / (h_1 + h_2)$ a $\bar{x} = L \cdot h_1 / (h_1 + h_2)$.

$$C_1 = \frac{-12 \cdot U \cdot h_1 \cdot h_2}{h_1 + h_2} \quad C_2 = \frac{-6 \cdot U \cdot \eta \cdot L}{(h_1^2 - h_2^2)}$$

Pro zjednodušení se zavádí poměr $m = h_2 / (h_1 - h_2) = h_2 / (\alpha \cdot L)$, který je obvykle mezi 0,8 až 1,2 a může být považován za konst.

$$K_p(\xi) = \frac{p(\xi)}{p_s} \cdot S_0 = \frac{m^2 \cdot \xi \cdot (1 - \xi)}{(1 + 2 \cdot m) \cdot (m + \xi)^2}$$

Stanovením rozložení tlaku $p(x)$ je dáno $\partial p/\partial x$ a tak určeno i rozložení rychlosti $u(x,y)$. V libovolném místě x lze potom integrovat $\int B \cdot u \cdot dy$ a tím stanovit průtočné množství Q . Nejjednodušší je to v místě maximálního tlaku, kde je $\partial p/\partial x=0$, tzn. $h=\bar{h}$ a $x=\bar{x}$. V tomto místě je průtočné množství Q dáno výrazem

$$Q = \frac{1 + m}{1 + 2 \cdot m} \cdot B \cdot U \cdot h_2 = K_Q \cdot B \cdot U \cdot h_2 \quad (4.31)$$

Stejně průtočné množství musí protékat i každým jiným místem x . Pro stanovení odporu proti pohybu je třeba určit tečné napětí τ_{xz} , které je dáno součinem viskozity a derivace rychlosti pro $y=0$ resp. $y=h$. Integrací přes plochu segmentu se získá třecí síla F_t . Součinitel tření je dán poměrem třecí síly F_t ku zatížení $\mu = F_t/F$, což po dosazení je vyjádřeno výrazem

$$\mu = \frac{F_t}{F} = \left\{ 4 \cdot m \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{m} \right) - \frac{6 \cdot m}{1 + 2 \cdot m} \right\} \cdot \frac{\eta \cdot U}{h_2 \cdot p_s} = K_t \cdot \frac{\eta \cdot U}{h_2 \cdot p_s} \quad (4.32)$$

Pro segmenty o konečné šířce B se podstatně změní rozložení tlaku výtokem maziva do stran. Na okrajích $z = \pm B/2$ bude nulový tlak a rozložení tlaku bude symetrické podle osy x . Rozložení tlaku se upraví tak, aby ve směru osy z mělo charakter křivky kosinus nebo paraboly. Toho se docílí např. vynásobením výrazem $\cos(\pi \cdot \zeta/2)$ nebo $(1 - 4 \cdot \zeta^2)$, kde bezrozměrná souřadnice $\zeta = z/(B/2)$. Rozložení tlaku na segmentu je znázorněno na obr.4.8 a je dáno vztahem

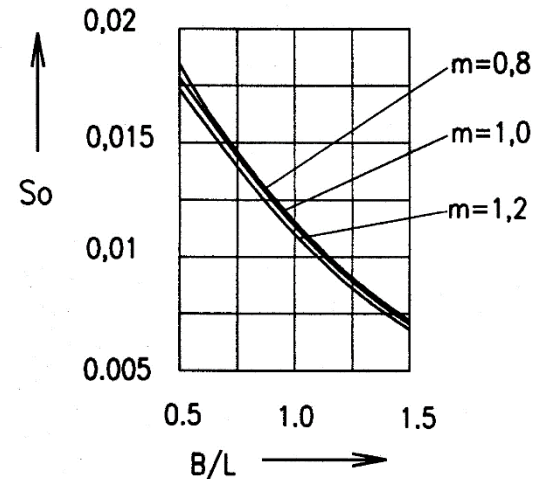
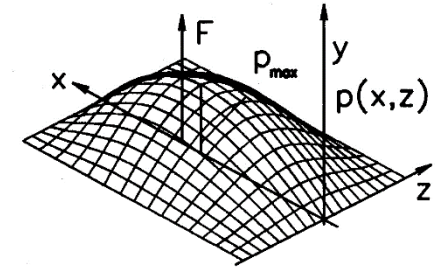
$$p(\xi, \zeta) = \frac{p_s}{K_{F\infty}} \cdot K_p(\xi) \cdot (1 - 4 \cdot \zeta^2) \quad (4.33)$$

Výslednice rozložení tlaku po integraci rozložení tlaku přes plochu segmentu bude $F = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot L^2 \cdot B/h_2^2 \cdot K_{F\infty} \cdot K_B$. Namísto součinitele $K_{F\infty}$ vystupuje nyní součinn $K_{F\infty} \cdot K_B = K_F = S_0$. Opravný součinitel únosnosti pro ložisko s konečnou šířkou K_B je

$$K_B = \frac{5}{6} \cdot \frac{1}{1 + a \cdot \left(\frac{L}{B} \right)^2} \quad (4.34)$$

Součinitel a , který je pouze funkcí poměru $m = h_2/(h_1 - h_2)$, je dán výrazem

$$a = \frac{10}{(1 + 2 \cdot m)^2} \cdot \left\{ (m + m^2)^2 + \frac{1 - 2 \cdot m \cdot (1 + m)}{12 \cdot [(1 + 2 \cdot m) \cdot \ln \frac{1+m}{m} - 2]} \right\} \quad (4.35)$$



Obr.4.8 Rozložení tlaku a Sommerfeldovo číslo axiálního ložiska

Třecí odpor segmentu konečné šířky se prakticky neliší od třecího odporu vypočteného pro segment nekonečné šířky. Protože pro segment konečné šířky zůstává zachováno vstupující množství maziva do spáry, ani průtočné množství se pro tento případ neliší od průtoku segmentem nekonečné šířky.

Axiální kluzná ložiska obvykle mívají vvislou osu a pohybující se kluznou plochu rovinnou tvaru mezikružří. V tomto případě bývá pohybující se rovinná kluzná plocha nad segmenty. Pro kotouč s rovinnou kluznou plochou se užívá označení běhoun. Segmenty vytvářejí spodní kluznou plochu. Mohou být pevně spojeny s rámem, avšak vzhledem k tloušťce spáry několik setin až desetiny mm je z hlediska přesnosti výroby výhodnější montovat naklápěcí segmenty. Pevné segmenty se použijí spíše pro malá ložiska, kde je přesnost výroby snáze dosažitelná. Pevné segmenty mají kluznou plochu rovinnou skloněnou pod malým úhlem asi několik úhlových minut (obr.4.9,a). Protože při rozběhu a doběhu dochází k opotřebení, bývá část plochy skloněná a část vodorovná (b). Výrobně jednodušší je kluzná plocha osazená (c), obtížně vyrobitelná je plocha zakřivená (d). Obrys segmentů může být tvořen částí - výsečí mezikružří (e), kruhem (h) nebo jiným tvarem (f, g).

Je-li ložisko určeno pouze pro jeden smysl otáčení, mají segmenty jednostranný sklon, pro oba směry otáčení mohou být segmenty střechovité se sklonem na obě strany. Plocha segmentů se volí tak, aby střední tlak na plochu segmentů byl asi $p_s = 2$ až 5 MPa. Minimální tloušťka spáry h_2 musí být větší, než je součet maximálních drsností povrchu kluzných ploch a možného čelního házení běhounu. Pro předběžnou volbu h_2 se používá vztah

$$h_{2min} = 1,34 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{D} \quad (4.36)$$

kde rozměr D je střední průměr kluzné plochy běhounu v mm a výsledná minimální tloušťka spáry h_{2min} je v mm. Třecími ztrátami v ložisku dochází ke vzniku tepla $P_z = \mu \cdot F \cdot U$. Tento tepelný výkon je asi ze 75% odváděn mazivem a zbytek je vedením hřídelem a segmenty, přestupem a sáláním předáván do blízkého okolí. Mazivem je odvedeno teplo za jednotku času

$$P_{zm} = Q \cdot \rho \cdot c \cdot (T_s - T_1) \quad (4.37)$$

V rovnici je Q průtočné množství maziva, c měrná tepelná kapacita maziva, ρ hustota maziva, T_s střední teplota maziva v ložisku a T_1 teplota maziva přiváděného do ložiska. Vedení a přestup tepla lze jen obtížně správně stanovit podle vztahu

$$P_{zv} = (\alpha_1 \cdot A_1 + \alpha_2 \cdot A_2 + k_3 \cdot A_3 + k_4 \cdot A_4) \cdot (T_s - T_0) \quad (4.38)$$

kde α_i je součinitel přestupu mezi hřídelem a tělesem ložiska a okolním ovzduším, A_i jsou příslušné plochy a k_i jsou součinitele prostupu tepla hřídelem a tělesem, tzn. součinitele tepelné vodivosti λ_i dělené tloušťkou materiálu. Tepelná vodivost je $\lambda = 43$ až 56 W.m⁻¹.K⁻¹ pro ocel nebo litinu, resp. pro lehké slitiny 150 W.m⁻¹.K⁻¹. Teplo předané sáláním se obvykle zanedbává. Vstupní teplota maziva T_1 bývá vyšší než teplota okolí T_0 . Lze volit teplotní rozdíl mezi střední teplotou v ložisku a teplotou přiváděného maziva roven 3/4 teplotního rozdílu mezi střední teplotou v ložisku a teplotou okolí. Potom je možno vyjádřit všechno odváděné teplo pomocí celkového součinitele odvodu tepla K_w , takže platí

$$P_z = P_{zm} + P_{zv} = K_w \cdot (T_s - T_0) \quad (4.39)$$

Rovnost třením vznikajícího tepla a tepla odváděného z ložiska je označována jako tepelná bilance ložiska. Pokud se tento vztah doplní vyjádřením součinitele tření μ , získá se závislost dynamické viskozity maziva η na střední teplotě T_s maziva v ložisku

$$K_w \cdot (T_s - T_0) = K_t \cdot B \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot L \cdot U^3 \cdot p_s}{6 \cdot K_F}} \quad (4.40)$$

Protože každé mazivo má svou vlastní závislost viskozity na teplotě, nastává se automaticky v ložisku takový stav, kdy jsou obě tyto závislosti splněny. Pro zvolené mazivo a zatížení ložiska se ustálí teplota a tloušťka spáry pro konstantní rychlost a dané rozměry ložiska na určitých hodnotách, které získáme řešením závislosti viskozity na teplotě pro mazivo a pro dané ložisko. Viskozitě přitom odpovídá tloušťka spáry. Řešení těchto vztahů se často provádí pomocí nomogramů. Řešení osvětlí následující příklad.

Příklad 4.5

Navrhnete hydrodynamicky mazané stacionární axiální ložisko s pevnými segmenty pro zatížení $F = 75000$ N a frekvence otáček $n = 1000$ min⁻¹. Určete průtočné množství maziva a jeho oteplení pro vstupní teplotu maziva $T_1 = 30^\circ\text{C}$.

Předpokládá se střední tlak $p_s = 3$ MPa a pro dodržení této hodnoty se volí rozměry segmentů při středním poloměru segmentů $R_s = 100$ mm, šířka segmentu $B = 50$ mm, délka segmentu $L = 50$ mm, středový úhel segmentu $\beta = L/R_s = 0,5 = 28,65^\circ$, počet segmentů $i = 10$.

Segmenty mají tvar obr.4.9e, plocha segmentu $A=0,025 \text{ m}^2$, plocha mezikruží je využita asi na 80%, střední tlak je

$$p_s = F/(i.A) = 75000/0,025 = 3 \text{ MPa.}$$

Úhlová rychlost běhounu je $\omega = \pi.n/30 = 104,72 \text{ s}^{-1}$, tomu odpovídající obvodová rychlost běhounu na středním poloměru R_s je

$$U = R_s . \omega = 0,1 . 104,72 = 10,472 \text{ m.s}^{-1}$$

Hodnota m je zvolena $m = h_2/(h_1 - h_2) = 0,8$ a podle rov.(4.35) je $a = 0,92986$, podle rov.(4.29) je součinitel $K_{F\infty} = 0,02669$, podle rov.(4.34) je součinitel $K_B = 0,43181$ a součin $K_{F\infty} . K_B = 0,011525$ a Sommerfeldovo číslo $So = 0,011525$. Pro mazání je zvolen ložiskový olej OL-32, který má při teplotě 50°C hustotu $\rho = 876 \text{ kg.m}^{-3}$, kinematickou viskozitu $\nu = 21,4 \text{ mm}^2.\text{s}^{-1}$ a dynamickou viskozitu $\eta = 0,01875 \text{ Pa.s}$.

Tloušťka spáry je předběžně

$$h_2 = \sqrt{(6.\eta.U.L.K_{F\infty}.K_B/p_s)} = \sqrt{(6.0,01875.10,47.0,05.0,02669.0,43181/3.10^6)} = 1,504.10^{-5} \text{ m,}$$

zaokrouhleno na $h_2 = 0,015 \text{ mm}$. Podle rov.(4.32) se určí součinitel $K_t = 0,7488$, součinitel tření je dán poměrem $\mu = F_t/F$, resp.

$$\mu = h_2 . K_t / (6.L.K_{F\infty}.K_B) = 1,504.10^{-5} . 0,7488 / (6.0,05.0,02669.0,43181) = 0,003257$$

a třením ztracený výkon je

$$P_z = \mu . F . U = 0,00326 . 75000 . 10,47 = 2558 \text{ W.}$$

Průtočné množství maziva na jeden segment je

$$Q = B . U . h_2 . (1 + m) / (1 + 2.m) = 0,05 . 10,47 . 1,5 . 10^{-5} . (1 + 0,8) / (1 + 2.0,8) = 5,436.10^{-6} \text{ m}^3 . \text{s}^{-1} = 0,33 \text{ l.min}^{-1}.$$

Při teplotě 50°C je měrná tepelná kapacita mazacího oleje OL-32 $c = 1930 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, pro teplo odvedené pouze mazivem platí

$$P_z = Q . c . \rho . (T_s - T_l) = 5,44.10^{-6} . 1940.876 . (T_s - 303) = 9,2387 . (T_s - 303),$$

po dosažení tloušťky spáry do třech ztrát platí ($K_F = K_{F\infty} . K_B = 0,011525$)

$$P_z = \mu . F . U = \sqrt{[(\eta.L.U^3.p_s)/(6.K_F)] . K_t . B} = \sqrt{[(0,01875.10,47^3.3.10^6)/(6.0,0115256)] . 0,7488 . 0,05} = 1868,1 . \sqrt{\eta},$$

Tepelná bilance představuje závislost viskozity η na teplotě v ložisku T_s ve tvaru

$$\sqrt{\eta} = 9,2387/1868,1 . (T_s - 303)$$

a tuto závislost je třeba řešit se závislostí viskozity oleje OL-32 na teplotě, která je dána výrazem $\eta = \eta_0 . \exp[-\beta . (T_s - T_0)]$. Pro teplotu 50°C má tento olej viskozitu $0,01875 \text{ Pa.s}$, takže vzhledem ke známé viskozitě $\eta_0 = 0,02816 \text{ Pa.s}$ při teplotě $T_0 = 313 \text{ K}$ je neznámá konstanta $\beta = 0,0409$. Pro teplotu asi $T_s = 328 \text{ K} = 55^\circ\text{C}$ je viskozita oleje použitého OL-32 $\eta = 0,0153 \text{ Pa.s}$ a stejnou hodnotu dává tepelná bilance. Tyto hodnoty jsou provozními hodnotami ložiska. Odpovídá jim minimální tloušťka spáry

$$h_2 = \sqrt{(6.\eta.U.L.K_t/p_s)} = \sqrt{(6.0,015.10,47.0,05.0,011525/3.10^6)} = 1,359.10^{-5} \text{ m} = 0,0136 \text{ mm.}$$

Součet drsností povrchu a házení musí být menší než tato minimální tloušťka filmu maziva.

Sklon rovinné kluzné plochy na segmentech je dán minimální tloušťkou spáry h_2 , poměrem $m = 0,8$ a délkou segmentu L a v řešeném případě bude

$$\alpha = \arctg[h_2/(m.L)] = \arctg[0,01359/(0,8.50)] = 0,0003397 \text{ rad} = 0,0195^\circ = 1' 10,06''.$$

Axiální ložisko splňuje požadované parametry. Předpokládané drsnosti kluzných ploch budou do $1 \mu\text{m}$, házení nutno udržet pod $0,01 \text{ mm}$.

Poloha těžiště tlakového tělesa

statický moment tělesa

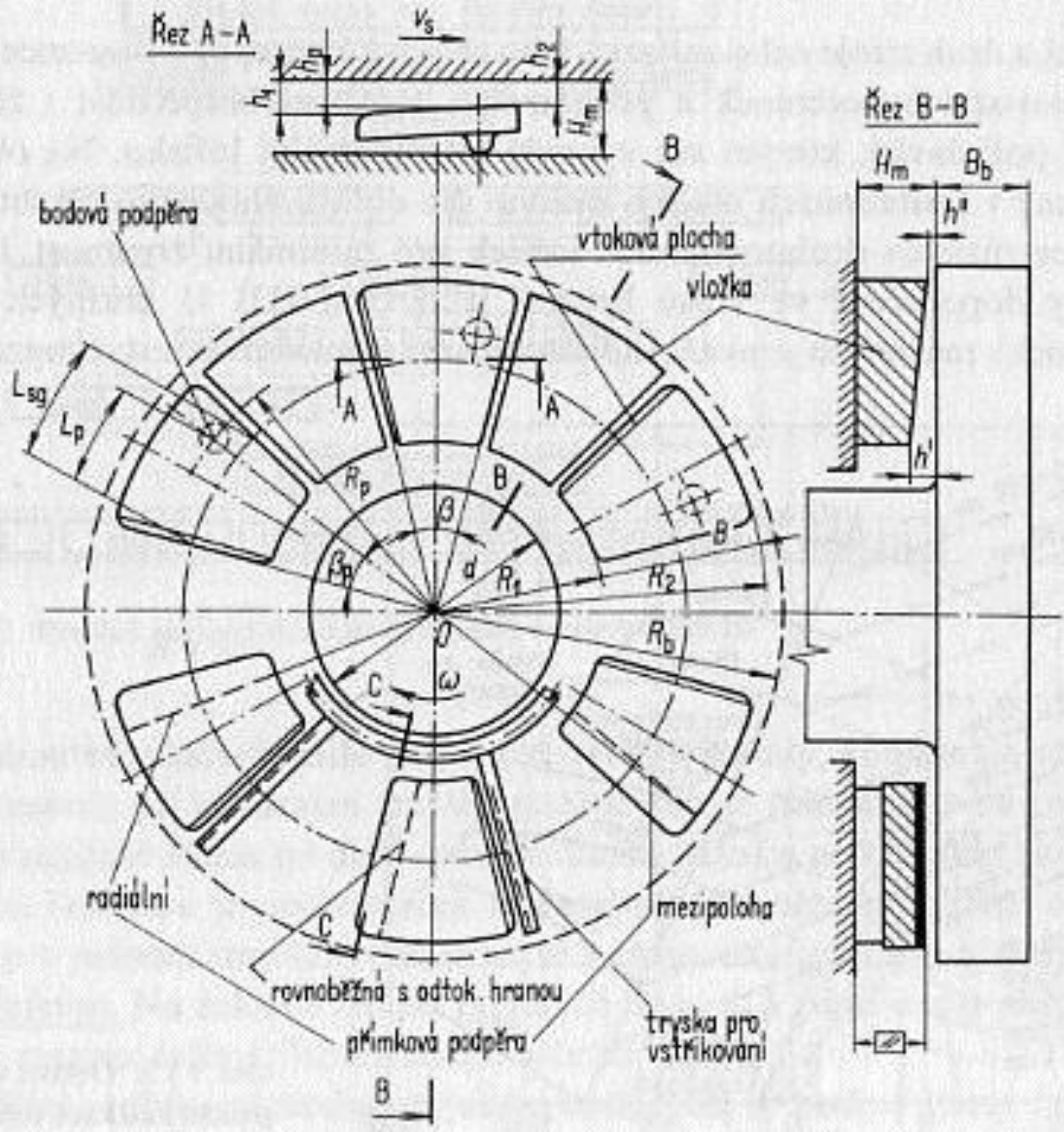
$$M_S = \int_0^L dx \int_{-B}^B p(x,z) \cdot x \cdot dz$$

výslednice F

$$F = \int_0^L dx \int_{-B}^B p(x,z) \cdot dz$$

poloha těžiště

$$x_T = M_S / F$$



Obr. 3.2.1. Schéma axiálního ložiska s označením geometrických veličin