

HYDROSTATICKÁ LOŽISKA

Hydrostatické mazání

- axiální ložiska
- radiální ložiska
- přímočará vedení

mohou nahradit uložení pomocí kladek (valivě nebo kluzně ul.)

Použití

- vytvoření nosné vrstvy maziva pro menší kluzné rychlosti
- vysoká tuhost – zvládá velké změny působící síly při malých změnách tloušťky
- kombinuje se s hydrodynamickým mazáním pro oblast rozběhu a doběhu, tzv. **hybridní ložiska** (zabrání se kontaktu kluzných ploch při nízkých kluzných rychlostech)

Elektroanalogie

použití zákonů pro stejnosměrné elektrické obvody (laminární průtok)
Ohmův zákon a Kirchhoffovy zákony

$$p = Q \cdot R_h$$

$$U = I \cdot R$$

$$\sum_i Q_i = 0$$

$$\sum_i I_i = 0$$

$$\sum_j p_j = \sum_i Q_i \cdot R_{hi}$$

$$\sum_j U_j = \sum_i I_i \cdot R_i$$

Pro zařízení pracující s plyny se užívají ložiska **aerostatická** (tlakový plyn je k dispozici)



Průtočné množství spárou při nepohybujících se plochách (směr osy y je směr do tloušťky spáry) je integrál součinu rychlosti a diferenciálu plochy (rychlost $u = 1 / (2 \cdot \eta) \cdot (h - y) \cdot y \cdot dp/dx$) a pro axiální ložisko je (h je konst.)

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^h u(x,y) \cdot dy \cdot x \cdot d\varphi = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \eta} \cdot \int_0^h \frac{dp}{dx} \cdot (h - y) \cdot y \cdot dy = \frac{\pi}{6 \cdot \eta} \cdot h^3 \cdot \frac{dp}{dx} \cdot x$$

Pro **axiální** ložisko je průtočné množství stejné ve všech průřezech pro $R_1 < x < R_2$ a pro tlak lze získat

$$\int_p^{p_2} dp = \int_r^{R_2} 6 \cdot \eta \cdot Q / (\pi \cdot h^3 \cdot x) \cdot dx \quad \text{resp.} \quad p_2 - p = 6 \cdot \eta \cdot Q / [(\pi \cdot h^3) \cdot \ln(R_2 / r)]$$

Okrajové podmínky – tlaky uvnitř tlakové komory p_1 a v odpadu p_2

Obvykle je $p_2 = 0$ a pro Q platí (p_1 je tlak v tlakové komoře – poloměr R_1)

$$Q = \pi \cdot h^3 / [(6 \cdot \eta) \cdot \ln(R_2 / R_1)] \cdot p_1 = p_1 / R_h$$

Hydraulické odpory spár v ložisku a dalších součástí hydraulických obvodů způsobí samovolné nastavení tloušťky spáry atd.

Krouticí moment pro překonání tření – tečné napětí (axiální ložisko, gradient rychlosti je $\omega \cdot x / h$)

$$M_t = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \tau \cdot x^2 \cdot d\varphi \cdot dx = 2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \omega / h \cdot \int_{R_1}^{R_2} x^3 \cdot dx = \pi / 2 \cdot \eta \cdot \omega \cdot (R_2^4 - R_1^4)$$

Pro **radiální** ložisko a průtok ve směru osy otáčení se tlakový spád považuje za podíl tlaku v komoře p_1 a délky spáry ve směru osy $L_s = (B - B_K) / 2$ a integruje se pro meze dané úhly α_1 a α_2 . Tloušťka spáry je dána výrazem $h(\varphi) = c \cdot (1 - \varepsilon \cdot \cos \varphi)$, kde c je rovnoměrně rozložená vůle v ložisku (polovina rozdílu průměru pánve a čepu), ε je tzv. relativní výstřednost čepu $\varepsilon = e / c$, kde e je vzdálenost osy čepu a osy pánve.

$$Q = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^h w(y, \varphi) \cdot dy \cdot r \cdot d\varphi = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^h (h - y) \cdot y / (2 \cdot \eta) \cdot p_1 / L_s \cdot dy \cdot r \cdot d\varphi = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} h^3 / (12 \cdot \eta) \cdot p_1 / L_s \cdot r \cdot d\varphi \int_0^1 c \cdot (1 - \varepsilon \cdot \cos \varphi) \cdot dy$$

Po dosazení za h je třeba integrovat funkci $\int (1 - \varepsilon \cdot \cos \varphi)^3 \cdot d\varphi =$

$$= \varphi - 3 \cdot \varepsilon \cdot \sin \varphi + 3 \cdot \varepsilon^2 \cdot (\varphi / 2 + 1 / 4 \cdot \sin 2\varphi) - \varepsilon^3 \cdot (\sin \varphi - 1 / 3 \cdot \sin^3 \varphi)$$

Za φ se dosadí integrační meze α_1 a α_2 a výraz je funkcí relativní výstřednosti ε . Pro hydraulický odpor $R_h = p / Q$ tedy plyne

$$R_h = 12 \cdot \eta \cdot L_s / [c^3 \cdot r \cdot M(\varepsilon)]$$

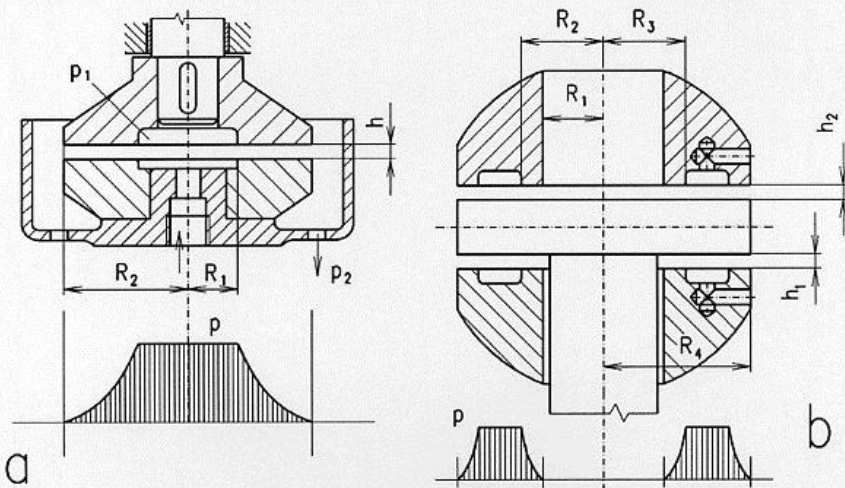
kanálek určité délky menšího průřezu různého tvaru, štěrbinu, spáru apod. Spára axiálního ložiska je spára mezi dvěma rovinnými kluznými plochami tvaru mezikruží, viz obr.4.5. V příkladu 4.4 je řešeno rozložení rychlosti kapaliny podél tloušťky spáry, rozložení tlaku s poloměrem a průtočné množství. Pro rychlost a tlak ve spáře platí

$$w = -\frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (h - y) \cdot y \cdot \frac{dp}{dr} \quad p = \frac{6 \cdot Q \cdot \eta}{\pi \cdot h^3} \cdot \ln \frac{R_2}{r} \quad (5.2.a,b)$$

Protože se jedná o rotačně souměrný případ, lze získat průtočné množství jednoduchou integrací rozložení rychlosti podél tloušťky spáry h a po celém obvodu. Tlak ve středové komoře je dán rov.(5.2.b) pro $r=R_1$. Hydraulický odpor mezikruhové spáry podle obr.4.5 je

$$R_h = \frac{\eta}{h^3} \cdot \frac{6 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}{\pi} \quad (5.3)$$

kde $R_2 > R_1$ jsou vnější a vnitřní poloměr okrajů spáry, h je tloušťka spáry. Jedna středově souměrná komora a kluzná plocha tvoří jednoduché kotoučové axiální ložisko určené jen pro jeden směr zatížení, obr.5.1.a. Obousměrné ložisko nemůže mít jedinou centrální tlakovou komoru. Na obr.5.1.b je obousměrné prstencové ložisko se dvěma mezikruhovými tlakovými komorami.



Obr.5.1 Jednosměrné kotoučové a obousměrné prstencové axiální ložisko

Na kluzné ploše axiálního ložiska může být více komor, např. kruhových. Podobně jako tlakové komory axiálního ložiska jsou uspořádány tlakové komory pro přímočaré vedení.

Rozložení tlaku podél poloměru ve spáře má podle rov.(5.2.b) logaritmický charakter. Pro komoru tvaru obdélníka u přímočarého vedení je podle příkladu 4.2 konstantní tlakový spád $dp/dx = (p_1 - p_2)/b$, kde b je délka spáry ve směru průtoku. Pro stanovení průtočného množství se uvažuje střední šířka spáry. Pro rozměry obdélníkové komory $L_K \times B_K$ a rozměry celé kluzné plochy včetně symetricky umístěné komory $L \times B$ je hydraulický odpor pro průtok spárou na všechny 4 strany

$$R_h = \frac{6 \cdot \eta}{h^3} \cdot \left[\frac{B + B_K}{L - L_K} + \frac{L + L_K}{B - B_K} \right]^{-1} \quad (5.4)$$

Hydraulický odpor je přímo úměrný dynamické viskozitě maziva a nepřímo úměrný třetí mocnině tloušťky spáry. Bývá uváděn v bezrozměrném tvaru, tzn. jako poměr $R_h \cdot h^3 / \eta$.

5.2 PRŮTOK SPÁROU RADIÁLNÍHO LOŽISKA

Tlakové komory radiálního ložiska mohou být rozloženy po obvodu celistvé kluzné plochy nebo jsou umístěny symetricky v segmentech rozdělené kluzné plochy. Segmenty jsou vytvořeny rozdělením kluzné plochy podélnými odpadními drážkami. Ložiska jsou označována v případě celistvé kluzné plochy jako komorová, v případě rozdělené jako segmentová. Ložiska mohou být úplná s obvodem 360° nebo neúplná, tzv. parciální, a podle schopnosti přenášet zatížení v obou směrech jednosměrná nebo obousměrná.

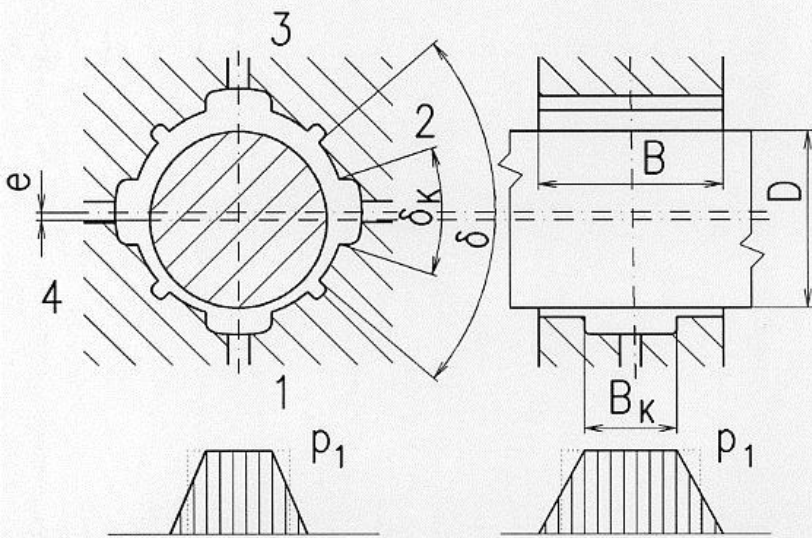
Z komory radiálního ložiska nastává průtok maziva ve směru osy ložiska a ve směru obvodu ložiska. Pro stanovení průtoku se vychází z integrace rozložení rychlosti podél tloušťky spáry, které je dáno vztahem analogickým k rov.(5.2.a), kde vystupuje derivace tlaku ve směru průtoku.

Při průtoku ve směru osy ložiska se předpokládá konstantní tlakový spád $(p_1 - p_2)/b$, kde b je vzdálenost komory od kraje ložiska (délka spáry). Pro integraci se předpokládá lineární rozložení tlaku mezi komorami nebo mezi komorou a odpadní drážkou. Meze integrace jsou pro komorové ložisko úhly

půlčí spáru mezi komorami, pro segmentové ložisko úhly půlčí kluznou plochu mezi okrajem komory a okrajem odpadní drážky. K těmto mezím se lineární rozložení tlaku ve směru obvodu převede na konstantní tlak, který se v místech mezi stupňovitě mění. Řešení lze ilustrovat na případu 4-segmentového ložiska a 4-komorového ložiska. Pro 4-segmentové ložisko se průtočné množství ve směru osy na obě strany získá integrací postupně provedenou pro všechny 4 segmenty ($i=1, \dots, 4$)

$$Q_{a,i} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{2 \cdot r \cdot p_i}{B - B_K} \cdot \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^{h(\varphi)} (y - h) \cdot y \cdot dy \cdot d\varphi \quad (5.5)$$

Za horní mez $h(\varphi)$ se dosadí funkce $h(\varphi) = c \cdot (1 - \varepsilon \cdot \cos \varphi)$. Integrační meze α_1 a α_2 jsou úhly měřené od svislé osy. Pro rozměry podle obr.5.2 je pro segment 1 úhel $\alpha_{1,2} = \pm(\delta + \delta_K)/4$, pro segment 2 $\alpha_{1,2} = \pi/2 \pm (\delta + \delta_K)/4$ a pro segment 3 platí $\alpha_{1,2} = \pi \pm (\delta + \delta_K)/4$. Pro svislé zatížení je případ souměrný podle svislé osy. Tlak v každé tlakové komoře se vyjadřuje součinem bezrozměrné funkce excentricity ϑ_i a tlaku zdroje p_c , takže je $p_i = \vartheta_i \cdot p_c$. Vztah pro průtočné množství pro průtok ve směru osy ložiska se upraví do tvaru

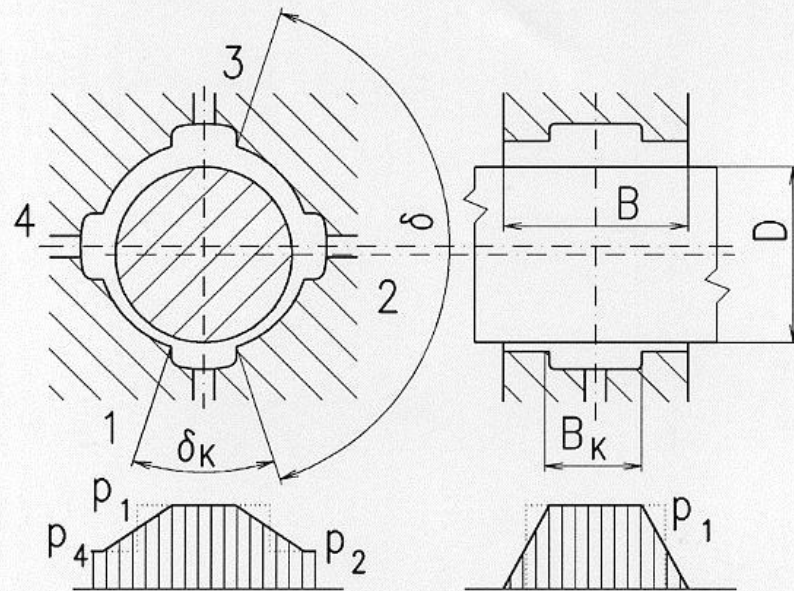


Obr.5.2 Hydrostatické radiální 4-segmentové ložisko

$$Q_a = \frac{c^3}{\eta} \cdot p_c \cdot \sum_{i=1}^4 M_i \cdot \vartheta_i \quad (5.6)$$

Součinitel M_i je bezrozměrný a zahrnuje vliv geometrie a excentricity. Geometrie je zadána poměrem šířky ložiska a jeho průměru B/D , poměrem délky komory k délce celé kluzné plochy ve směru obvodu δ_K/δ a analogickým poměrem ve směru osy ložiska B_K/B .

Analogicky se postupuje u 4-komorového ložiska. Zatímco u segmentového ložiska klesá tlak ve spáře mezi komorami z tlaku v komoře na barometrický tlak v odpadní drážce, u ložiska komorového se lineárně mění z tlaku v jedné komoře na tlak v druhé sousední komoře. Proto se změnila integrační meze v rovnici (5.5) s ohledem na rozměry komorového ložiska na obr.5.3.



Obr.5.3 Hydrostatické radiální 4-komorové ložisko

Při průtoku ve směru obvodu ložiska se mění podél spáry derivace tlaku podle souřadnice ve směru obvodu dp/ds . Protože libovolným průřezem spáry musí protékat stejné průtočné množství a tlak se nemění podle tloušťky spáry, lze integrací získat výraz pro průtočné množství na jednu stranu z komory

$$Q_{b,i} = \frac{B + B_K}{4 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{ds} \cdot \int_0^h (y - h) \cdot y \cdot dy \quad (5.7)$$

a z něho stanovit průběh tlaku podél spáry. Pro zjednodušení lze dosadit lineární funkci pro tloušťku spáry ve tvaru $h = h_I + (h_{II} - h_I) \cdot s/s_0$. Tloušťka spáry se lineárně mění od hodnoty h_I na počátku spáry u komory až na hodnotu h_{II} na konci spáry u odpadní drážky. Délka s_0 je délka spáry $s_0 = (\delta - \delta_K) \cdot D/4$, s je souřadnice ve směru obvodu. Průběh tlaku se určí integrací dp/ds a neznámá integrační konstanta plyne z velikosti tlaku $p=0$ pro $s=s_0$. Pro průtočné množství při průtoku na jednu stranu j z tlakové komory platí

$$Q_{bj,i} = \frac{1}{3 \cdot \eta \cdot D} \cdot \frac{(B + B_K)}{(\delta - \delta_K)} \cdot \frac{h_I^2 \cdot h_{II}^2}{(h_I + h_{II})} \cdot \vartheta_i \cdot p_i \quad (5.8)$$

Pro stanovení hydraulického odporu jednoho segmentu je třeba sečíst průtoky ve směru obvodu a ve směru osy ložiska. Pro komorové ložisko se průtok ve směru obvodu mezi komorami zanedbává. Po úpravě je možno pro hydraulický odpor jedné komory segmentového ložiska získat výraz

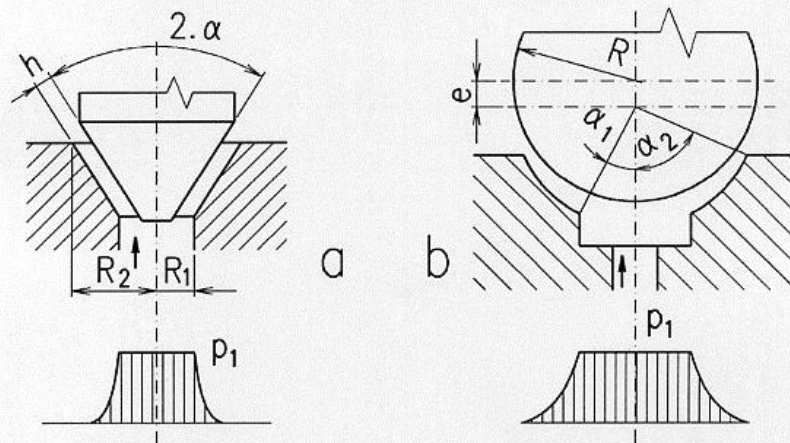
$$R_h = \frac{\eta}{c^3 \cdot \vartheta_i} \cdot \left[M_{a,i} + \sum_{j=1}^2 M_{bj,i} \right]^{-1} \quad (5.9)$$

Kromě rovinné a válcové kluzné plochy se pro speciální případy konstruují hydrostatická kluzná ložiska s kluznými plochami kulovými nebo kuželovými. Jsou používána např. v přístrojích, kde má být minimalizován třecí odpor. Hydrostatické ložisko s kuželovými kluznými plochami je na obr.5.4.a a má hydraulický odpor dán výrazem

$$R_h = \frac{\eta}{h^3} \cdot \frac{6 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}{\sin \alpha} \quad (5.10)$$

Na obr.5.4.b je hydrostatické ložisko s kulovými kluznými plochami. Hydraulický odpor pro průtok tímto ložiskem je

$$R_h = \frac{6 \cdot \eta}{\pi \cdot e^3} \cdot \left[\ln \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha_1} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_2} \right) \right] \quad (5.11)$$



Obr.5.4 Hydrostatické ložisko kuželové a kulové

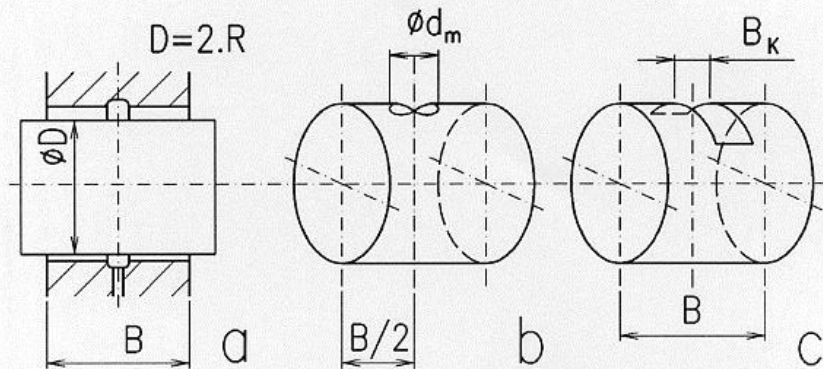
Komory hydrostatického ložiska představují několik hydraulických odporů, které jsou uspořádány paralelně vedle sebe - sčítají se průtočná množství. Celkový hydraulický odpor je převrácenou hodnotou součtu převrácených hodnot paralelních odporů.

Hydraulický odpor spáry a komory se při změně zatížení může měnit. Předpokládáme, že přívodní tlak zdroje p_c je konstantní a při změně zatížení dojde ke změně rozložení tlaku ve spáře a změně tlaku v komoře, neboť mezi zdroj tlaku a komoru je vřazen hydraulický odpor, tzv. reduktor tlaku. Zjednodušeně se dá vyložit nutnost použití reduktoru tlaku tak, že má zabránit přímému propojení tlakových komor. V případě přímého propojení by u obousměrného ložiska bylo mazivo převáděno propojením komor bez odporu do odlehčené komory.

5.3 PRŮTOK SPÁROU HYDRODYNAMICKÉHO LOŽISKA

Přívod maziva do hydrodynamického radiálního ložiska má být umístěn v oblasti nízkého nebo nulového hydrodynamického tlaku, aby nenarušil vytvořené hydrodynamické tlakové pole. Tlakové pole má maximum podstatně vyšší, než je přívodní tlak maziva pro hydrodynamické ložisko.

Přívod maziva je proveden pomocí mazací kapsy, podélné nebo obvodové mazací drážky nebo pouhým otvorem v kluzné ploše. Mazací drážky ve směru obvodu propojují místa vysokého tlaku s místy s nulovým tlakem. Nejsou vhodné, protože snižují únosnost, neboť narušují tlakové pole. Vhodnější jsou podélné drážky nebo kapsy. Samotný mazací otvor se může snadno ucpat nečistotou v mazivu a často z této příčiny dochází ke kavitačnímu opotřebení poblíž tohoto otvoru ve směru pohybu maziva. Typy přívodů maziva jsou na obr.5.5.



Obr.5.5 Přívody tlakového maziva v hydrodynamickém ložisku

Pro přívod jediným mazacím otvorem v kluzné ploše lze s přibližností použít vztah pro průtok kotoučovým axiálním ložiskem upravený do tvaru

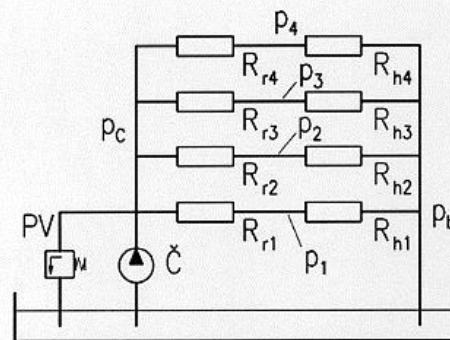
$$Q = \frac{R^3 \cdot \psi^3}{\eta} \cdot \frac{\pi \cdot (1 + \varepsilon)^3}{6 \cdot \ln \frac{B}{d_m}} \cdot p_1 \quad (5.12)$$

Bude-li použita mazací kapsa o šířce B_k , je možno použít předchozí vztah s nahrazením průměru B/d_m poměrem B/B_k . Pro přívod maziva do obvodové spáry se použije vztah pro osový průtok radiálním ložiskem a průtok bude

$$Q = \frac{R^3 \cdot \psi^3}{\eta \cdot B/D} \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \cdot \varepsilon^2\right) \cdot p_1 \quad (5.13)$$

5.4 ROZLOŽENÍ TLAKU A JEHO VÝSLEDNICE

V komorách hydrostatického ložiska se nastaví tlak podle velikosti hydraulického odporu reduktoru tlaku, který je umístěn v přívodu k tlakové komoře, a hydraulického odporu spáry okolo tlakové komory. Přívody tlakového maziva a odpady při předpokládaném laminárním průtoku tvoří jednoduchou síť, kterou je možno řešit pomocí elektroanalogie s elektrickými obvody se stejnosměrným proudem.



Obr.5.5 Odporová síť napájení 4-komorového ložiska

Elektrické napětí má obdobu v tlaku, proud v průtočném množství a ohmický odpor v hydraulickém odporu. Pro řešení sítě sestávající ze smyček se používají Ohmův a dva Kirchhoffovy zákony. Podle těchto zákonů je úbytek tlaku roven součinu průtočného množství a hydraulického odporu, rov.(5.1), součet přítoků a odtoků v určité místě větvení je nulový podle zákona zachování hmoty a součet tlaků zdrojů s odečtením tlakových úbytků na odporech je na uzavřené smyčce nulový. Jednoduchá

síť napájení komor 4-komorového ložiska přes reduktory tlaku je na obr.5.5. Ve všech větvích je součet úbytků tlaků na odporech $Q_i \cdot R_{r,h}$ roven tlaku zdroje. Po vyjádření průtoku $Q_i = p_i / R_{hi}$ a dosazení platí pro tlaky v komorách

$$p_i = \frac{1}{1 + \frac{R_{ri}}{R_{hi}}} \cdot p_c = \vartheta_i \cdot p_c \quad (5.14)$$

Výraz pro stanovení tlaku v jednotlivých komorách obsahuje poměr hydraulických odporů reduktoru a komory. Tento poměr je funkcí tloušťky spáry h u rovinné kluzné plochy nebo funkcí excentricity ε u rotační kluzné plochy. Hodnoty tlaku v komorách vedou na vytvoření rozložení tlaku, které je v

rovnováže se zatížením. Ve spáře mezi komorou a okrajem kluzné plochy nebo okrajem sousední komory se tlak mění. Jeho průběh je např. pro axiální kotoučové ložisko dán rov.(5.2.b) a znázorněn na obr.5.1.a. Integrací tohoto průběhu přes plochu spáry a přičtením součinu tlaku v komoře s plochou komory se určí velikost výslednice. Pro představu se používá pro velikost výslednice objem tlakového tělesa. Výslednice tlaku kotoučového ložiska je

$$F = \pi \cdot R_2^2 \cdot \frac{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2}{2 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot p_1 = A \cdot C \cdot \vartheta \cdot p_C \quad (5.15)$$

Celková plocha ložiska je označena A , bezrozměrný součinitel C vyjadřuje vliv geometrie komory a spáry a bezrozměrný součinitel ϑ udává snížení tlaku vlivem vřazeného reduktoru tlaku. Stejný výraz platí pro výslednici tlaku kuželového ložiska, obr.5.4.a.

Pro ostatní typy hydrostatických ložisek postačí pro určení výslednice uvažovat lineární průběh tlaku ve spáře. Rozhodující význam má součin průmětu plochy komory a tlaku v ní. U obousměrných ložisek se účinky protilehlých komor odečítají. Komory, jejichž osa je pootočená od nositelky zatížení o 60° až 120° , mají jen nepatrný nebo žádný vliv na velikost výslednice tlaku a lze je zanedbat. Lineární rozložení tlaku mezi komorami se převádí pomocí představy tlakového tělesa se zkosenými hranami na těleso stejného objemu se svislými hranami. Pro 4-segmentové ložisko z obr.5.2 a obdobně pro 4-komorové ložisko z obr.5.3 je výslednice tlaku

$$F = D \cdot B \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_K}{B}\right) \cdot \sin\left(\frac{\delta_K + \delta}{4}\right) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_3) \cdot p_C \quad (5.16)$$

Pro kulové ložisko, které má stejný poloměr kulových ploch čepu a pánve je velikost výslednice tlaku

$$F = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{\ln \left(\frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}} \right)} \cdot \vartheta \cdot p_1 \quad (5.17)$$

Úhel α_2 musí být menší než 90° a úhel α_1 nesmí být roven 0 ani příliš malý. Kulové ložisko stejně jako axiální ložisko kotoučové nebo prstencové a kuželové vyžadují, aby zatížení F leželo v ose otáčení a nevyvolávalo nerovnoměrnou tloušťku spáry po obvodě. V případě šikmo působícího zatížení je třeba rozdělit tlakové komory po obvodě podobně jako u přímočarého vedení.

5.5 TŘECÍ ZTRÁTY A ZTRÁTOVÝ VÝKON

Třecí odpor při kapalinném tření je dán tečným napětím v kapalině na povrchu čepu. Pro zjednodušení se předpokládá pouhá rotace čepu v pánvi a neuvažuje se při tom hydrostatický průtok. Při rotaci čepu je rychlost lineární rozložená podél tloušťky spáry, takže tečné napětí je dáno výrazem

$$\tau = \eta \cdot \frac{R \cdot \omega}{h} \quad (5.18)$$

Třecí sílu lze získat integrací přes plochu povrchu čepu. Protože v místech tlakových komor je řádově mnohonásobně větší tloušťka vrstvy maziva než ve spáře, je tečné napětí v ploše komor zanedbatelné. Je výhodnější integrovat napětí přes celou plochu ložiska a potom odečíst integrály přes plochu komor. Pro jednoduché kotoučové ložisko je třením ztracený výkon

$$P_{z1} = R \cdot \omega \cdot \int_A \tau \cdot dA = \frac{\pi \cdot \eta \cdot \omega^2}{2 \cdot h} \cdot (R_2^4 - R_1^4) \quad (5.19)$$

neboť tloušťka spáry je konstantní. U radiálních ložisek se tloušťka spáry mění po obvodě. Pro tečné napětí postačí uvažovat lineární rozložení rychlosti. Integrace tečného napětí potom vede na integrál

$$P_{z1} = \frac{\eta \cdot \omega^2 \cdot R^3}{c} \cdot \int_0^{\alpha_b} \int_{\alpha_a}^B \frac{d\varphi \cdot dz}{1 - \cos \varphi} = \frac{2 \cdot \eta \cdot \omega^2 \cdot R^3 \cdot B}{c \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \cdot \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{\frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon}}} \Big|_{\alpha_a}^{\alpha_b}$$

Pro integraci přes celé ložisko jsou meze $\alpha_a = 0$ až $\alpha_b = 2 \cdot \pi$, pro integraci přes komoru odpovídající úhly měřené od svislé osy zatížení. Celý příkon zdroje tlaku (čerpadla) jde na účet ztrát. Celkové ztráty jsou

$$P_z = P_{z1} + P_{z2} \quad P_{z2} = Q \cdot p_C \quad (5.21)$$

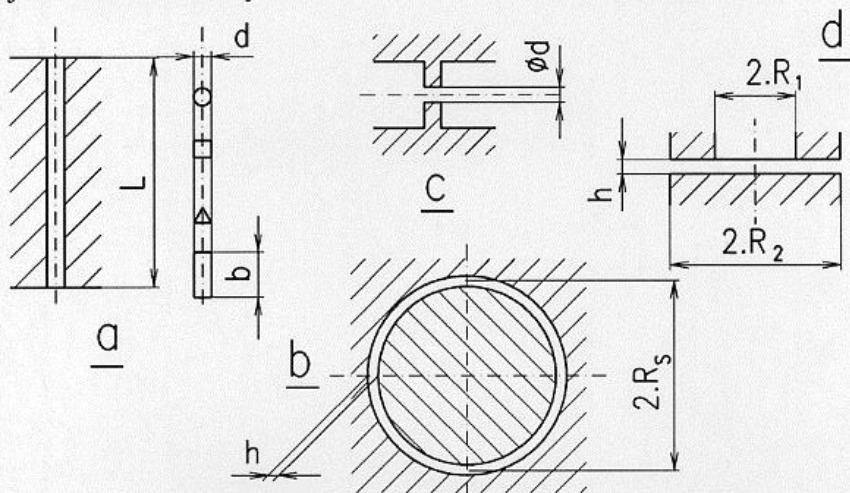
5.6 REDUKTORY TLAKU

Reduktory tlaku jsou hydraulické odpory vřazené do přívodu maziva ke každé tlakové komoře. Mají zabránit přímému propojení tlakových komor a zvýšit tuhost ložiska. Jejich hydraulický odpor je konstantní nebo se mění podle dalšího odporu ve větvi - odporu spáry patřící ke komoře. Reduktory tlaku se dělí na :

- 1) reduktory s konstantním hydraulickým odporem (kapilární),
- 2) reduktory clonkové (s možností místní turbulence),
- 3) membránové reduktory,
- 4) šoupátkové reduktory,
- 5) reduktory s konstantním průtočným množstvím.

Odpor hydraulického reduktoru tvoří tenký dlouhý kanálek různého průřezu - kruh, čtverec, obdélník, trojúhelník, obr.5.7. Kanálek může být vytvořen ve šroubovici. Další možný průřez je tenký protáhlý obdélník nebo mezikruží. Používá se také spára stejného charakteru, jako je spára kotoučového axiálního ložiska. Lze použít průtok šterbinou na válcové ploše.

Clonkový reduktor je velmi jednoduchý a potřebuje minimum místa. Clonka musí být vyměnitelná kvůli možnosti doladění. Reduktory musí být co nejblíže tlakové komoře.



Obr.5.7 Odpory reduktorů tlaku a - kapilární, b- clonkový, c,d - spára

Pro laminární průtok kanálem s rozměrem d , viz obr.5.7.a, platí pro hydraulický odpor výraz, kde konstanta K je pro:

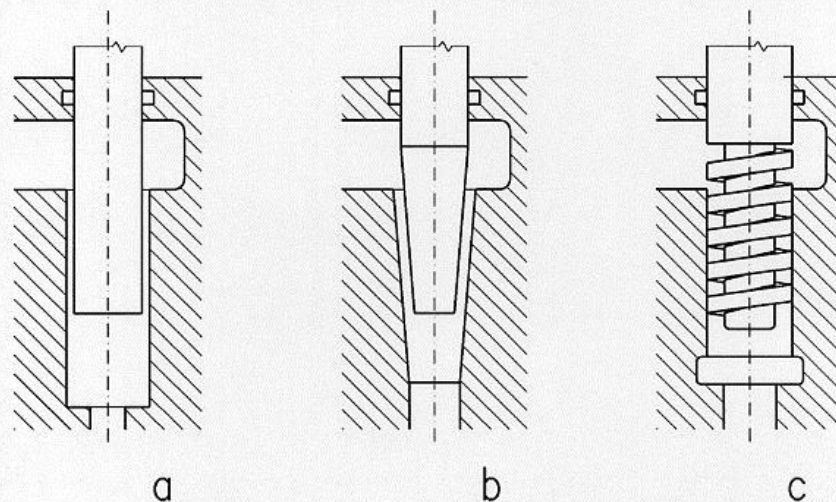
kruh $K=128/\pi$, čtverec $K=28,5$, trojúhelník $K=17$, obdélník $K=12.d/b$.

$$R_r = K \cdot \eta \cdot \frac{L}{d^4} \quad (5.22)$$

Průtok clonkou, obr.5.7.c, je místně turbulentní a pro průtočné množství platí

$$Q = \alpha_c \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_i)}{\rho}} \quad (5.23)$$

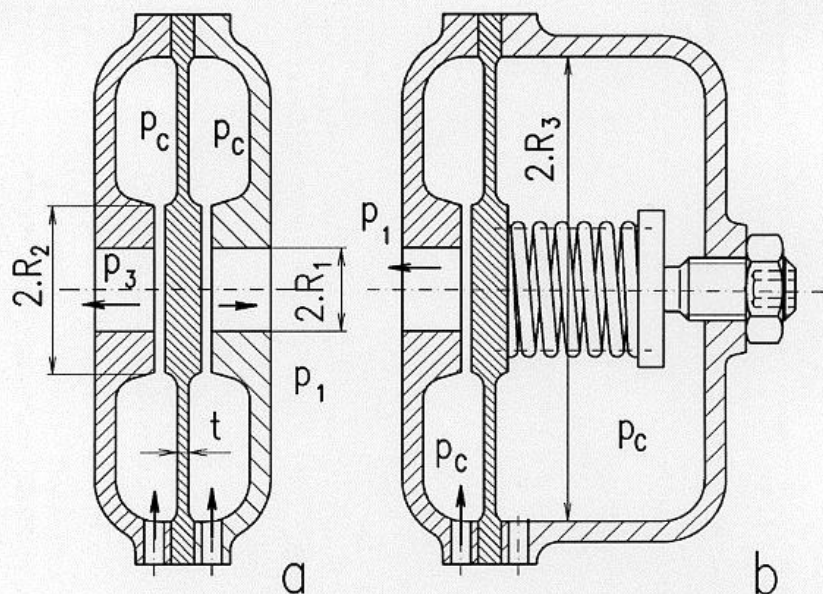
kde α_c je součinitel průtoku clonou (např. pro poměr průřezů clonky a potrubí 1/2 je $\alpha_c=0,7$). Průtok mezikruhovou spárou je řešen v příkladu 4.3, ale pro odpor reduktoru s touto spárou postačí použít vztah rov.(5.22), kde šířku spáry použijeme $b=2 \cdot \pi \cdot R_s$. Konstruktivní provedení reduktorů umožňuje jednoduché nastavení hodnoty R_h v určitém rozsahu, viz obr.5.8. Z výrobních důvodů je



Obr.5.8 Kapilární reduktory s možností nastavení R_h

vhodnější použití mezikruhovú spáry (a,b) nebo kanálku ve šroubovici (c) než vrtání dlouhého otvoru malého průměru. Doladování je možné posuvem čepu.

Membránové reduktory mají zabudovanou pružnou kalenou broušenou membránu se zesílenými okraji a střední částí. Hydraulický odpor se mění podobně jako u spáry kotoučového ložiska s tloušťkou spáry. Ta se řídí tlakovým rozdílem mezi vstupním a výstupním tlakem z reduktoru. Protože tlak p_c působí



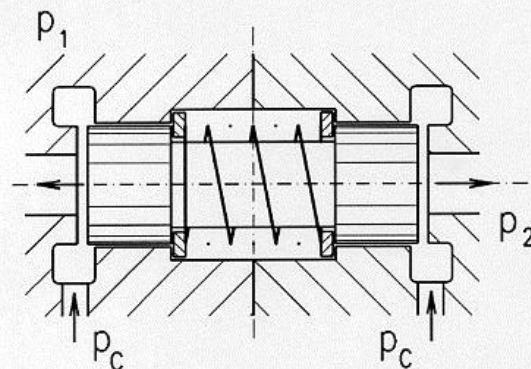
Obr.5.9 Jednostranný a oboustranný membránový reduktor

na membránu z obou stran, je síla působící na membránu dána pouze rozdíly tlakových těles od tlaků ve spáře a v komorách. Tuhost membrány s pevně vetknutým vnějším a vnitřním okrajem je pro poměr $R_3/R_2 = \beta$ dána vztahem

$$K_M = \frac{4 \cdot \pi \cdot t^3 \cdot E}{3 \cdot R_2^2 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{[(\beta^2 - 1)^2 - (2 \cdot \beta \cdot \ln \beta)^2]} \quad (5.24)$$

Na membráně je síla od tlaku maziva v rovnováze se silou odpovídající deformaci membrány a případně další tlačné pružiny. Před zavedením tlakového maziva je v reduktoru nastavena tloušťka spáry x_0 . Ta v oboustranném reduktoru zůstává stejná i pro stejný tlak $p_1 = p_2$. Stejný tlak v tlakových komorách ložiska je pro nezátížené ložisko $F=0$. Velikost konstantního hydraulického odporu kapilárních reduktorů a stejně tak velikost spáry pro membránový reduktor

nezátíženého ložiska se volí tak, aby tlakový spád na reduktoru byl stejný jako ve spáře ložiska. Oboustranný reduktor se používá pro ložiska se sudým počtem tlakových komor a připojují se k němu protilehlé komory. Jednostranný reduktor se používá pro jednosměrná jednokomorová ložiska.



Obr.5.10 Šoupátkový reduktor oboustranný

při změnách zatížení a tlaku p_i . Získá se tak reduktor s konstantním průtokem, obr.5.11.

Šoupátkový reduktor může dosahovat hydraulického odporu různými konstrukčními úpravami. Pro přesunutí šoupátka je třeba překonat pasivní odpory a setrvačnost hmoty šoupátka. Funkce šoupátkového reduktoru je obdobná jako membránového reduktoru. Při použití nelineární pružiny a další úpravou lze vyladit šoupátkový reduktor tak, že se nebude měnit průtočné množství maziva

5.7 TUHOST HYDROSTATICKÉHO LOŽISKA

Tuhost hydrostatického ložiska je dána parciální derivací únosnosti podle souřadnice ve směru posuvu kluzných ploch. Pro přibližné vyjádření postačí poměr přírůstku únosnosti k přírůstku souřadnice polohy. Pro tuhost platí

$$K = \frac{\partial F}{\partial y} \approx \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad (5.25)$$

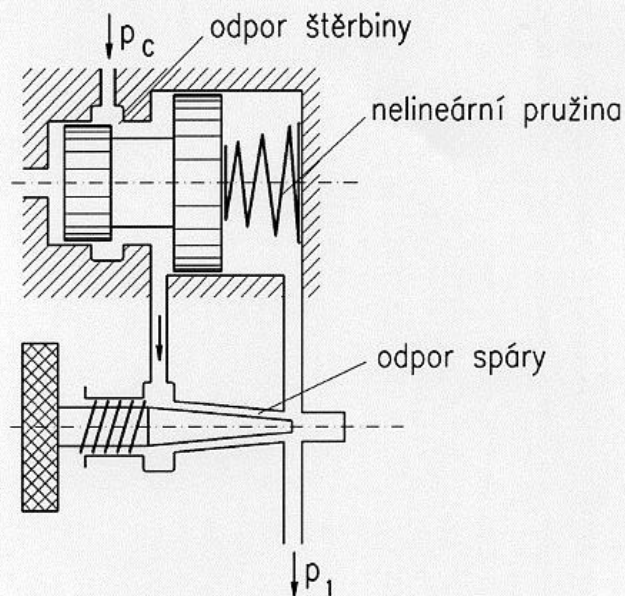
kde souřadnice y je orientována ve směru zatížení. Protože se používá vyjádření únosnosti rov.(5.15) a (5.16), kde vystupuje plocha ložiska a tlak zdroje p_c a ostatní veličiny jsou vyjádřeny pomocí bezrozměrných parametrů, vyjadřuje se tuhost rovněž pomocí bezrozměrných parametrů ve tvaru

$$\chi = \frac{K}{A \cdot C \cdot p_c} \cdot h_0 \quad (5.26)$$

kde h_0 je počáteční tloušťka spáry axiálního ložiska (pro obousměrné nezátížené ložisko) nebo rovnoměrná vůle $h_0=c$ radiálního ložiska. Při vhodné volbě parametrů lze získat vysokou tuhost hydrostatického ložiska.

Protože podle rov.(5.16) je únosnost ložiska dána součinem konstantních hodnot $A.C.p_c$ a hodnoty ϑ , která je funkcí excentricity ε , je možno bezrozměrnou tuhost χ považovat za parciální derivaci

$$\chi = \frac{\partial \vartheta}{\partial \varepsilon} \quad (5.27)$$

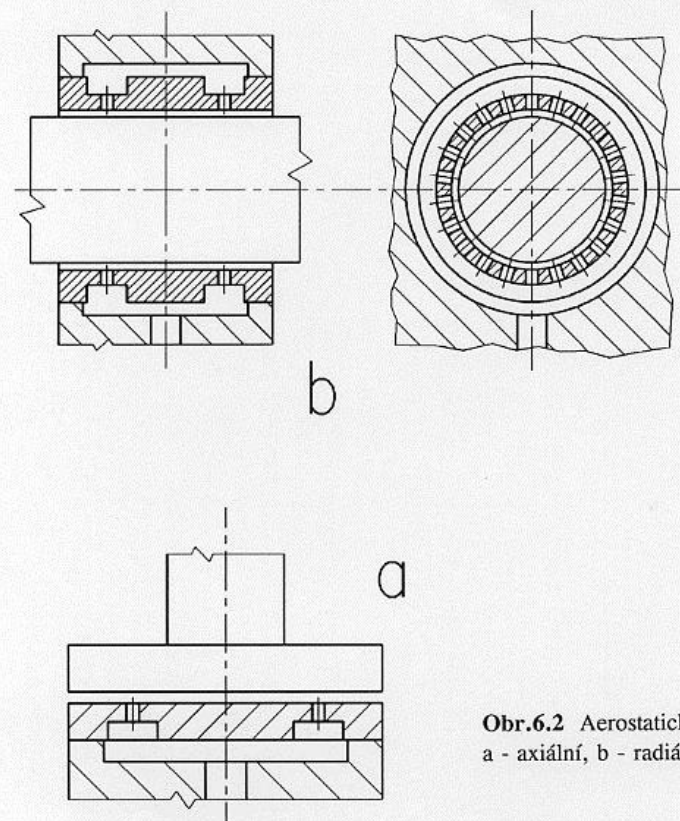


Obr.5.11 Reduktor tlaku s konstantním průtokem

Hydrostatická ložiska musí být použita tehdy, má-li být zajištěn spolehlivý provoz i při malé kluzné rychlosti, kdy nelze docílit potřebné tloušťky vrstvy maziva hydrodynamicky a při tom se požaduje provoz s kapalinným třením bez opotřebení. Kluzná ložiska s kapalinným třením se vyznačují malým třecím odporem a velkým tlumícím účinkem proti rázům. Nehrozí jim nebezpečí poškození třecích ploch náhlou změnou zatížení. Tato odolnost je ještě podstatně zvýšena u hydrostatických ložisek, která mohou mít vysokou tuhost. Proto jsou

Tabulka 6.1 Dynamická viskozita a hustota některých plynů

Plyn	Dynamická viskozita $\eta \cdot 10^5$ [Pa.s] při teplotě [°C]			Hust. ρ 25°C [kg.m ⁻³]
	-173°	27°	627°	
vzduch	0,738	1,849	3,89	1,233
CO ₂	0,511	1,518	3,65	
N ₂	0,725	1,773	3,72	1,20
He	1,001	2,042	4,14	0,173
Ar	0,876	2,291	4,91	
H ₂		0,904		0,087

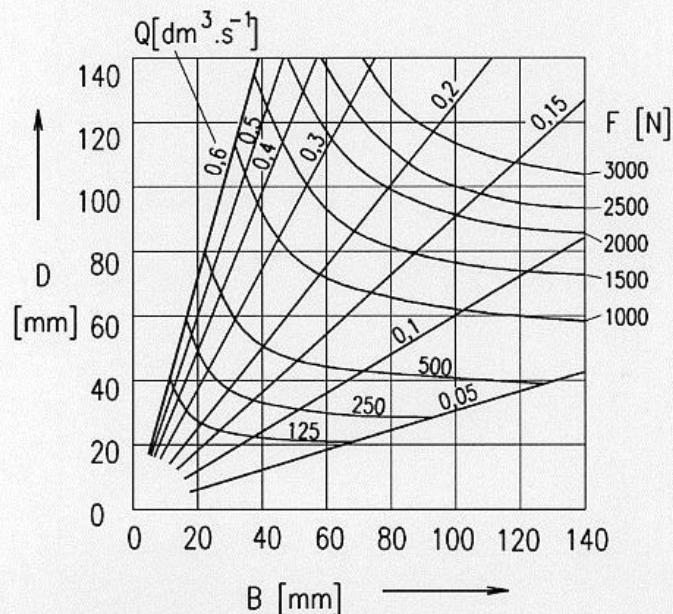


Obr.6.2 Aerostatická ložiska:
a - axiální, b - radiální

6.2 AEROSTATICKÁ LOŽISKA

Ve spáře ložiska se udržuje tlakové pole přívodem tlakového plynu od zdroje tlaku. Laminární průtok představuje nižší energetické ztráty, ale vzhledem k malé viskozitě plynů musí být tloušťka spáry velmi malá. Tím jsou kladeny vysoké nároky na přesnost výroby a malou drsnost povrchu kluzných ploch. Pokud jsou zachovány podmínky pro laminární proudění, lze postupovat při návrhu stejně jako u hydrostatických ložisek. Podobně jako u hydrostatických ložisek příkon zdroje tlakového plynu představuje z hlediska celého zařízení ztrátu.

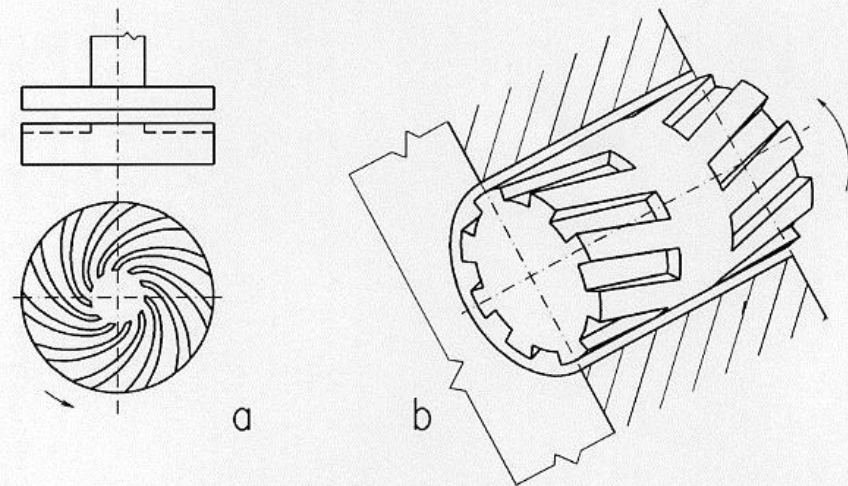
Aerostatická ložiska pracují v oblasti vysokých rychlostí. Při průtoku plynu dochází snadno k přechodu na turbulentní proudění a často se u těchto ložisek objevuje nestabilita. Protože pracují bez kontaktu kluzných ploch, nedochází k opotřebení a náklady na energii zdroje mohou být vyváženy nízkými náklady na údržbu. Používají v oblasti textilních strojů, vysokootáčkových vřeten obráběcích strojů, v přístrojové technice. Na obr.6.2 jsou znázorněna jednoduchá axiální a radiální aerostatická ložiska.



Obr.6.3 Rozměry, zatížení a průtok radiálního aerostatického ložiska

Vzhledem k malé viskozitě plynů musí mít aerodynamická ložiska menší tloušťku spáry, což vyžaduje vyšší přesnost výroby. Současně je nutná velmi malá drsnost povrchu. Proto je třeba zajistit rovněž vysokou čistotu plynu jeho dokonalým filtrováním.

Konstrukční úpravy povrchů kluzných ploch mohou vést k vtažování plynu do spáry. Axiální ložiska jsou konstruována se spirálně se sbíhajícími drážkami na jedné kluzné ploše, obr.6.1.a. Radiální ložiska mohou mít na jedné kluzné ploše drážky vinuté do šroubovice a tento tvar zlepšuje aerodynamický účinek, obr.6.1.b.

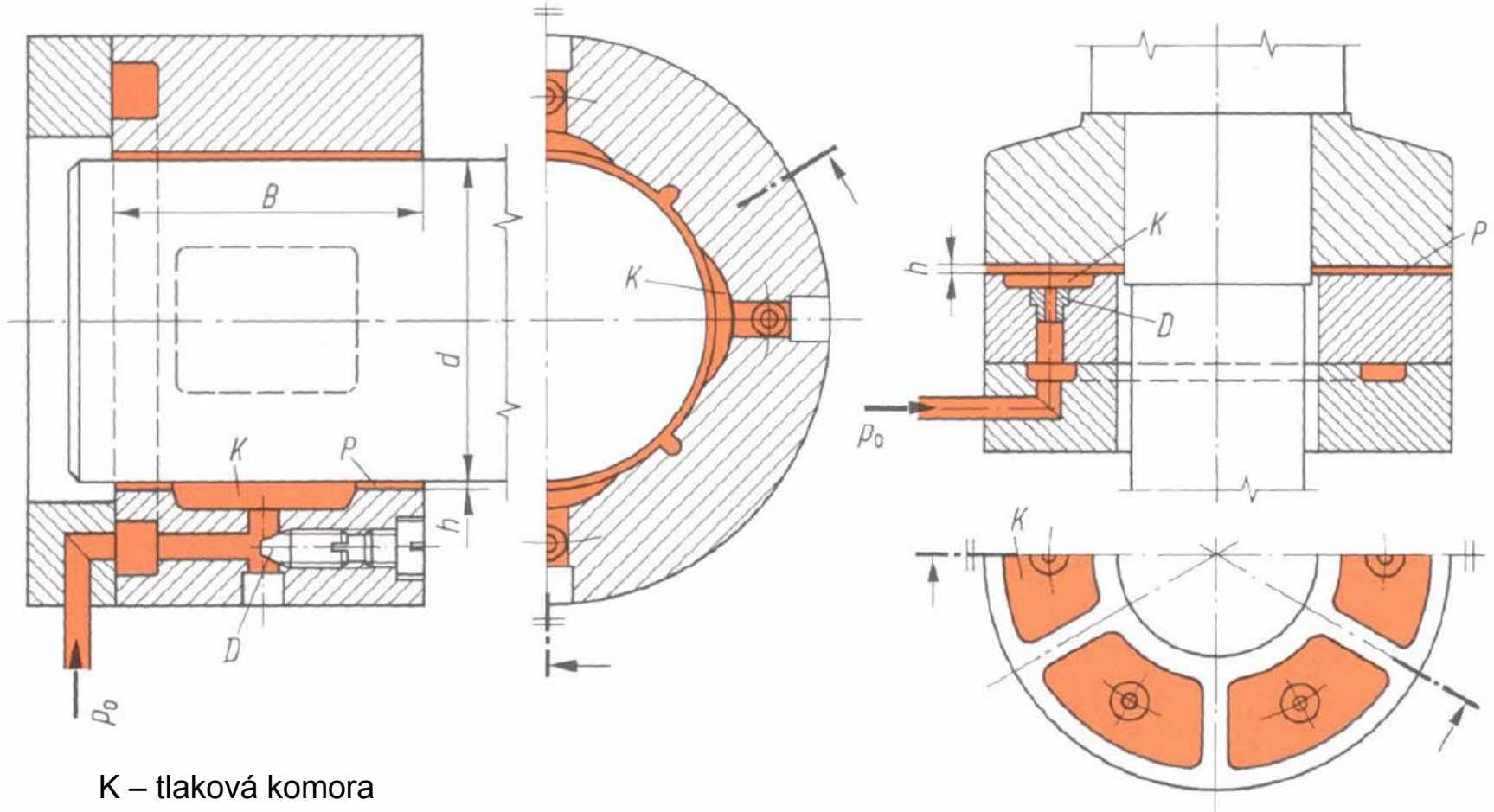


Obr.6.1 Aerodynamická ložiska s drážkami

Aerodynamická ložiska nemohou vytvořit tlakové těleso dostatečné nosnosti při rozběhu a doběhu a při poklesu rychlosti. Protože jejich provozní rychlost je vždy velká, hrozí při nižší rychlosti poškození kluzných ploch. Kluzné plochy mohou být z tohoto důvodu zhotoveny z materiálů s dobrými vlastnostmi pro tyto nouzové podmínky. Běžně se však provozují tato ložiska jako aerostatická pro nižší rychlosti a jako aerodynamická při vyšších rychlostech.

Aerodynamická ložiska mohou spolehlivě a s velmi malými ztrátami pracovat, pokud byla správně navržena, vyrobena a smontována. Splnění těchto požadavků je ekonomicky náročné, a proto se dosud používají převážně v některých přístrojích a v oblasti dopravy a zkapalňování plynů. Velkou nevýhodou těchto ložisek je jejich malá tuhost.

Konstrukční řešení radiálního a axiálního hydrostatického ložiska



K – tlaková komora

P – spára pro vytvoření hydraulického odporu

D – reduktor tlaku (konstantní nebo nastavitelný hydraulický odpor)

Literatura:

Bečka, J.: Vybrané stati z částí strojů. Skriptum ČVUT v Praze 1988.

Bečka, J.: Konstrukční cvičení. Skriptum ČVUT v Praze 1986 a další vyd.

Bečka, J.: Tribologie. Monografie, ČVUT v Praze 2007.

Odpor reduktorů tlaku:

Hagen-Poiseuův zákon $Q = \pi \cdot d^4 \cdot \Delta p / (128 \cdot \eta \cdot L)$ pro kruhový průřez, tj. $R_h = \Delta p / Q$ laminární průtok

Clonka $R_h = Q \cdot \rho / (2 \cdot S^2 \cdot \alpha_c^2) = v \cdot \rho / (2 \cdot S \cdot \alpha_c^2)$ kruhový průřez, clonka – místní odpor - turbulence