

KKS/ KVS, KOS

# Vedení hydrostatická - příklady

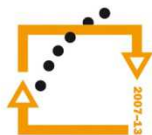
Zdeněk Hudec

verze - 1.0

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE  
DO ROZVOJE  
VZDĚLÁVÁNÍ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Hledáte kvalitní studium?

### Nabízíme vám jej na Katedře konstruování strojů

Katedra konstruování strojů je jednou ze šesti kateder Fakulty strojní na Západočeské univerzitě v Plzni a patří na fakultě k největším. Fakulta strojní je moderní otevřenou vzdělávací institucí uznávanou i v oblasti vědy a výzkumu uplatňovaného v praxi.

Katedra konstruování strojů disponuje moderně vybavenými laboratořemi s počítačovou technikou, na které jsou např. studentům pro studijní účely neomezeně k dispozici nové verze předních CAD (Pro/Engineer, Catia, NX ) a CAE (MSC Marc, Ansys) systémů. Laboratoře katedry jsou ve všední dny studentům plně k dispozici např. pro práci na semestrálních, bakalářských či diplomových pracích, i na dalších projektech v rámci univerzity apod.

Kvalita výuky na katedře je úzce propojena s celouniverzitním systémem hodnocení kvality výuky, na kterém se průběžně, zejména po absolvování jednotlivých semestrů, podílejí všichni studenti.

V současné době probíhá na katedře konstruování strojů významná komplexní inovace výuky, v rámci které mj. vznikají i nové kvalitní učební materiály, které budou v nadcházejících letech využívány pro podporu výuky. Jeden z výsledků této snahy máte nyní ve svých rukou.

V rámci výuky i mimo ni mají studenti možnost zapojit se na katedře také do spolupráce s předními strojírenskými podniky v plzeňském regionu i mimo něj. Řada studentů rovněž vyjíždí na studijní stáže a praxe do zahraničí.

### Nabídka studia na katedře konstruování strojů:

Bakalářské studium (3roky, titul Bc.)		
Studijní program	B2301: strojní inženýrství („zaměřený univerzitně“)	B2341: strojírenství (zaměřený „profesně“)
Zaměření	Stavba výrobních strojů a zařízení Dopravní a manipulační technika	Design průmyslové techniky Diagnostika a servis silničních vozidel Servis zdravotnické techniky
Magisterské studium (2roky, titul Ing.)		
Studijní program	N2301: Strojní inženýrství	
Zaměření	Stavba výrobních strojů a zařízení Dopravní a manipulační technika	

Více informací naleznete na webech [www.kks.zcu.cz](http://www.kks.zcu.cz) a [www.fst.zcu.cz](http://www.fst.zcu.cz)

**Západočeská univerzita v Plzni, 2012**

ISBN 978-80-261-0395-0

© doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.

### ***Předmluva***

Předkládaná publikace slouží pro studium předmětů KVS a KOS strojní fakulty. Je zaměřena na konstrukci hydrostatických vedení obráběcích strojů. Text je členěn na 2 kapitoly:

- Hydrostatické vedení rovinné pro přímočarý pohyb. V této kapitole jsou odvozeny základní vztahy pro výpočet ložisek s konstantní hydraulickou vodivostí a s konstantním proudem se vzájemným nebo tíhovým předepnutím. Výsledné hodnoty určují tlak, proud, hydraulický výkon a tuhost ložiska.
- Hydrostatické vedení rovinné pro kruhový pohyb. Tento typ vedení je dále členěn na hydrostatická ložiska axiální a ložiska pro přenos axiální síly a klopného momentu.

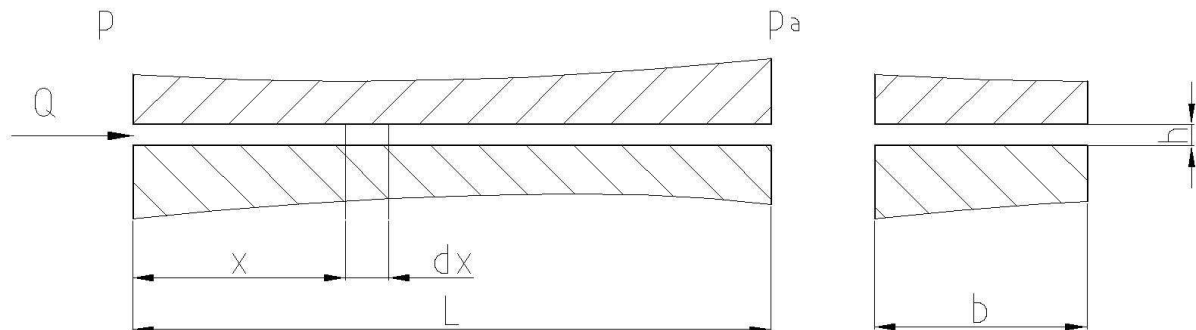
## OBSAH

1	Hydrostatické vedení rovinné pro přímočarý pohyb.....	5
1.1	Průtok oleje mezerou .....	5
1.2	Hydrostatické ložisko rovinné předepnuté tíhou – charakteristické veličiny.....	5
1.3	Regulace prvkem s konstantní hydraulickou vodivostí ( $G_R = \text{konst.}$ ).....	8
1.4	Regulace prvkem s konstantním proudem ( $Q = \text{konst.}$ ) .....	17
1.5	Vliv změny teploty na charakteristické parametry ložiska.....	21
1.5.1	System s kapilárou (konstantní hydraulická vodivost $G_R = \text{konst.}$ ).....	21
1.5.2	System s regulací prvkem s konstantním proudem ( $Q = \text{konst.}$ ) .....	21
1.6	Optimální rozměry rovinného hydrostatického ložiska obdélníkového tvaru.....	22
1.7	Stanovení zatížení ložiska z celkového zatížení vedení .....	26
1.8	Hydrostatická rovinná ložiska s odsáváním odpadního oleje.....	28
1.9	Hydrostatické rovinné ložisko kruhového tvaru.....	30
1.10	Hydrostatická ložiska vzájemně předepnutá.....	35
1.10.1	Zatížení a transformace sil do soustavy souřadnic vedení .....	35
1.10.2	Zatížení párů vedení .....	36
1.10.3	Zatížení dvojice předepnutých ložisek, maximální hodnota .....	37
1.10.4	Rozměry a součinitelé ložisek.....	38
1.10.5	Regulace prvkem s konstantní hydraulickou vodivostí ( $G_R = \text{konst.}$ ) .....	41
1.10.5.1	Součinitel vodivosti kapilár .....	41
1.10.5.2	Reakce ložisek, tlak čerpadla.....	42
1.10.5.3	Předpětí a tuhost ložisek .....	44
1.10.5.4	Tlak v ložisku, proud, hydraulický výkon ložiska.....	44
1.10.5.5	Proud a hydraulický výkon vedení .....	46
1.10.6	Regulace prvkem s konstantním proudem ( $Q = \text{konst.}$ ).....	52
1.10.6.1	Reakce a tlakové předpětí ložisek, tlak čerpadla.....	52
1.10.6.2	Předpětí a tuhost ložisek .....	55
1.10.6.3	Tlak v ložisku, proud, hydraulický výkon ložiska.....	55
2	Hydrostatické vedení rovinné kruhového pohybu .....	58
2.1	Hydrostatická ložiska axiální vzájemně předepnutá.....	58
2.2	Hydrostatická ložiska rovinná pro přenos axiální síly a klopného momentu s regulací $Q = \text{konst.}$ .....	63
2.2.1	Rozměry a součinitelé ložisek.....	64
2.2.2	Počáteční podmínky ložiska.....	67
2.2.3	Zatížení.....	68
2.2.4	Tlak v ložisku při zvedání desky.....	68
2.2.5	Tloušťka olejového filmu, posunutí a sklon desky, tlaky v komorách a tlak čerpadla.....	68
2.2.5.1	Centrické zatížení ložiska.....	68
2.2.5.2	Excentrické zatížení ložiska .....	69
2.2.6	Hydraulický a třecí výkon ložiska.....	70
	SEZNAMY.....	78
	Seznam tabulek .....	78
	Seznam obrázků .....	78
	Seznam použité literatury .....	79
	Firemní literatura (katalogy, www.).....	79
	Publikace .....	79
	Přílohy .....	79

# 1 Hydrostatické vedení rovinné pro přímočarý pohyb

## 1.1 Průtok oleje mezerou

$L$ [m]	.....	délka mezery
$b$ [m]	.....	šířka mezery
$h$ [m]	.....	výška mezery (tloušťka olejového filmu)
$p$ [MPa]	.....	tlak oleje na vstupu do mezery (tlak v komoře)
$p_a = 0$ [MPa]	.....	tlak oleje na výstupu oleje z mezery
$\rho = (0,87-0,9) \cdot 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]	.....	měrná hmotnost oleje
$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	.....	kinematická viskozita oleje
$\eta$ [kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	.....	dynamická viskozita oleje
$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	.....	průtokové množství
$G$ [kg <sup>-1</sup> ·m <sup>4</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	.....	hydraulická vodivost mezery



**Obr. 1 - Průtok mezerou**

Množství oleje je dáno vztahem:

$$Q = pG \frac{b}{L} \dots\dots\dots (1)$$

Kde  $G$  je hydraulická vodivost dle vztahu:

$$G = \frac{h^3}{12\eta} \dots\dots\dots (2)$$

a dynamická viskozita:

$$\eta = \rho \cdot \nu \dots\dots\dots (3)$$

## 1.2 Hydrostatické ložisko rovinné předepnuté tíhou – charakteristické veličiny

$F, F_0$ [N]	.....	zatížení ložiska
$h, h_0$ [m]	.....	tloušťka olejového filmu
$k_F$ [-]	.....	součinitel únosnosti ložiska
$k_Q$ [-]	.....	součinitel průtoku ložiska
$p, p_0$ [MPa]	.....	tlak v komoře ložiska

Hydrostatické ložisko (Obr. 2) je určeno těmito rozměry:

$B_l$ [m]	.....	šířka ložiska
$L_l$ [m]	.....	délka ložiska

$b_1$  [m]..... šířka komory  
 $l_1$  [m]..... délka komory

Z těchto parametrů se stanoví rozměry:

➤ efektivní délka mezery ve směru „a“

$$l_a = \frac{B_1 - b_1}{2} \dots\dots\dots (4)$$

➤ efektivní délka mezery ve směru „u“

$$l_u = \frac{L_1 - l_1}{2} \dots\dots\dots (5)$$

➤ efektivní šířka mezery ve směru „a“

$$b_a = \frac{L_1 + l_1}{2} \dots\dots\dots (6)$$

➤ efektivní šířka mezery ve směru „u“

$$b_u = \frac{B_1 + b_1}{2} \dots\dots\dots (7)$$

Průtok oleje z komory hydrostatického ložiska se následně stanoví pomocí vztahu

$$Q = pG \frac{b}{L} \dots (1).$$

Dosazením substitucí  $b = b_a$ ,  $L = l_a$ , dále  $b = b_u$ ,  $L = l_u$  se stanoví průtoky:

$$Q_a = p * G * \frac{b_a}{l_a} \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_u = p * G * \frac{b_u}{l_u} \dots\dots\dots (9)$$

Celkový průtok ložiskem je následně dán vztahem:

$$Q_k = 2 * (Q_a + Q_u) = 2 * p * G * \left( \frac{b_a}{l_a} + \frac{b_u}{l_u} \right) \dots\dots\dots (10)$$

Označíme výraz  $k_Q$  součinitel průtoku ložiskem:

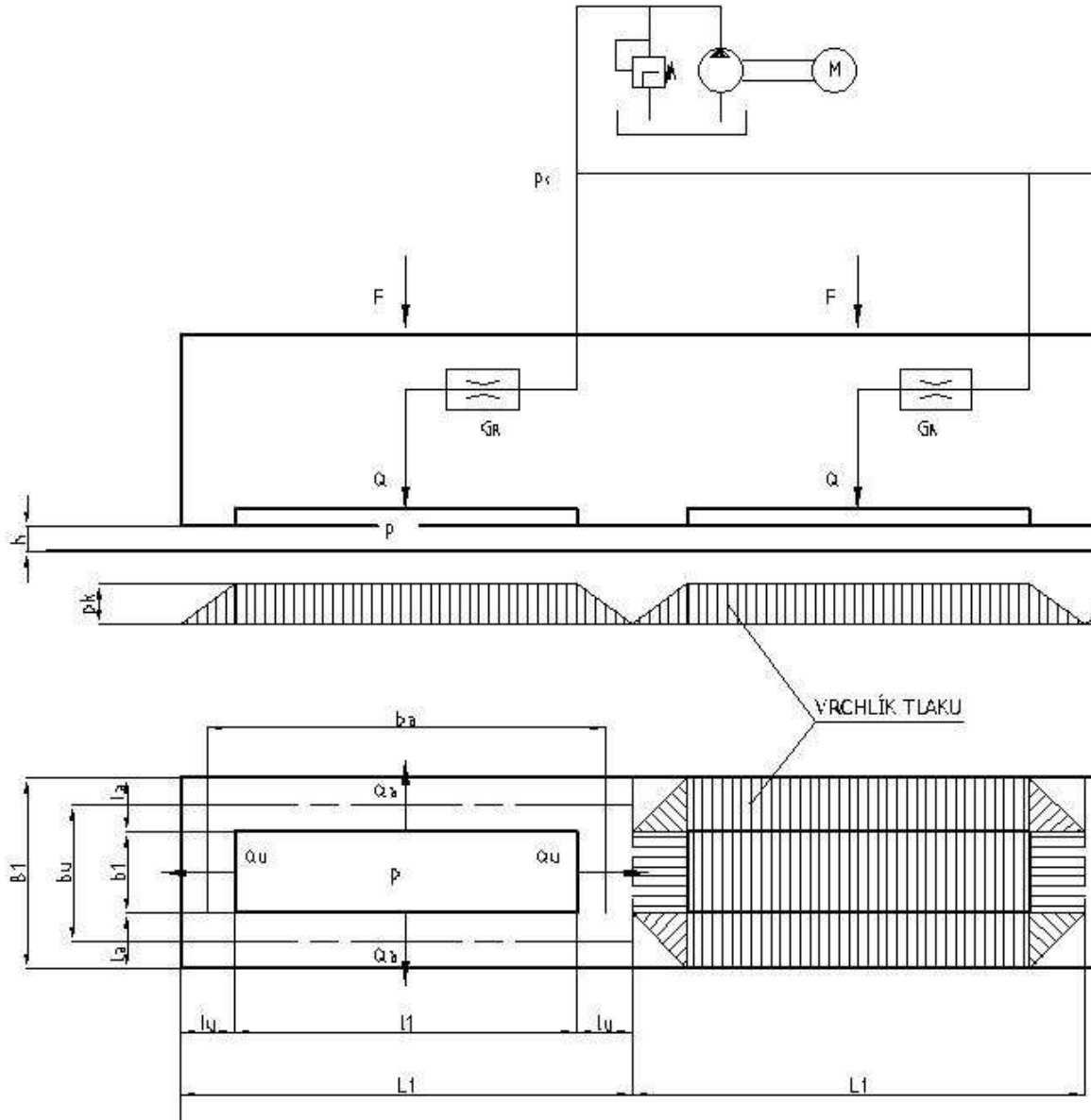
$$k_Q = 2 \left( \frac{b_a}{l_a} + \frac{b_u}{l_u} \right) \dots\dots\dots (11)$$

Dosazením za  $b_a$ ,  $b_u$  ze vztahů  $b_a = \frac{L_1 + l_1}{2} \dots\dots (6)$ ,  $b_u = \frac{B_1 + b_1}{2} \dots (7)$ :

$$k_Q = 2 \left( \frac{L_1 + l_1}{L_1 - l_1} + \frac{B_1 + b_1}{B_1 - b_1} \right) \dots\dots\dots (12)$$

Celkový průtok ložiskem je poté dán vztahem:

$$Q = p * G * k_Q \dots\dots\dots (13)$$



**Obr. 2 - Hydrostatické ložisko rovinné**

Zatížení ložiska je dáno vztahem:

$$F = p * A * k_F \dots\dots\dots (14)$$

Kde je:

- celková plocha ložiska

$$A = L_1 * B_1 \dots\dots\dots (15)$$

- součinitel únosnosti ložiska

$$k_F = \frac{A_e}{A} \dots\dots\dots (16)$$

kde  $A_e$  je efektivní plocha ložiska, která se stanoví z objemu tlakového vrchlíku dle Obr. 2, který se rovná síle ložiska tj.:

$$\frac{p}{6}(L_1 * b_1 + B_1 * l_1 + 2 * B_1 * L_1 + 2 * b_1 * l_1) = F = p * A_e \dots \dots \dots (17)$$

Z tohoto vztahu plyne:

$$A_e = \frac{1}{6}(L_1 * b_1 + B_1 * l_1 + 2 * B_1 * L_1 + 2 * b_1 * l_1) \dots \dots \dots (18)$$

Dosažením do  $k_F = \frac{A_e}{A} \dots \dots \dots (16)$  se stanoví součinitel únosnosti ložiska:

$$k_F = \frac{L_1 * b_1 + B_1 * l_1 + 2 * B_1 * L_1 + 2 * b_1 * l_1}{6 * L_1 * B_1} \dots \dots \dots (19)$$

### 1.3 Regulace prvkem s konstantní hydraulickou vodivostí ( $G_R = konst.$ )

Pro průtok do komory přes hydraulický prvek s konstantní vodivostí platí:

$$(p_c - p) * G_R = Q_k = p * G * k_Q \dots \dots \dots (20)$$

Kde jsou:

- $G_R$  [ $kg^{-1} \cdot m^4 \cdot s^{-1}$ ] ..... hydraulická vodivost regulačního prvku (kapiláry)
- $G$  [ $kg^{-1} \cdot m^4 \cdot s^{-1}$ ] ..... hydraulická vodivost ložiska
- $p_c$  [MPa] ..... tlak oleje na čerpadle
- $p$  [MPa] ..... tlak oleje v komoře ložiska

Při seřizování ložiska jsou dány tyto parametry:

- $h_0$  [m]....počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou  $F_0$
- $F_0$  [N]....předpětí ložiska tíhou

Při zatěžování ložiska je dáno:

$F_M$  [N]....max. zatížení ložiska

Ze vztahu  $G = \frac{h^3}{12\eta} \dots \dots \dots (2)$  poté plyne počáteční hydraulická vodivost ložiska:

$$G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots \dots \dots (21)$$

Ze vztahu  $F = p * A * k_F \dots \dots \dots (14)$  se stanoví:

➤ počáteční tlak v komoře:

$$p_0 = \frac{F_0}{A * k_F} \dots \dots \dots (22)$$

➤ max. tlak v komoře:

$$p_M = \frac{F_M}{A * k_F} \dots \dots \dots (23)$$



Ze vztahu  $Q = p * G * k_Q$  ..... ( 13 )  
nadále plyne počáteční proud:

$$Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q \dots\dots\dots ( 24 )$$

Ze vztahu  $(p_c - p) * G_R = Q_k = p * G * k_Q$  ..... ( 20 ) se stanoví vodivost kapiláry pro  $p = p_0$ :

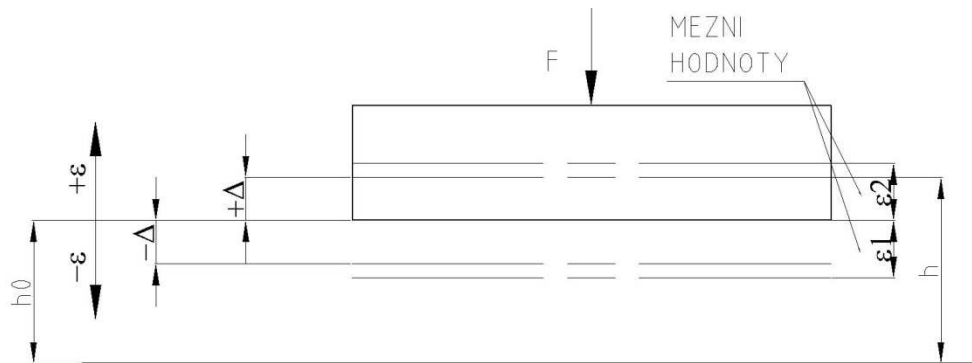
$$G_R = \frac{p_0}{p_c - p_0} * G_0 * k_Q = \frac{1}{\frac{p_c}{p_0} - 1} * G_0 * k_Q \dots\dots\dots ( 25 )$$

$$G_R = \frac{p_0}{p_c - p_0} * G_0 * k_Q = \frac{1}{\frac{p_c}{p_0} - 1} * G_0 * k_Q \dots\dots\dots ( 25 ), \quad G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots ( 21 ) \text{ a}$$

Dosažením

$G = \frac{h^3}{12\eta} \dots ( 2 )$  do  $(p_c - p) * G_R = Q_k = p * G * k_Q$  ..... ( 20 ) se stanoví tlak v komoře v závislosti na tloušťce olejového filmu  $h$ :

$$p = \frac{p_c}{1 + \left( \frac{p_c}{p_0} - 1 \right) \left( \frac{h}{h_0} \right)^3} \dots\dots\dots ( 26 )$$



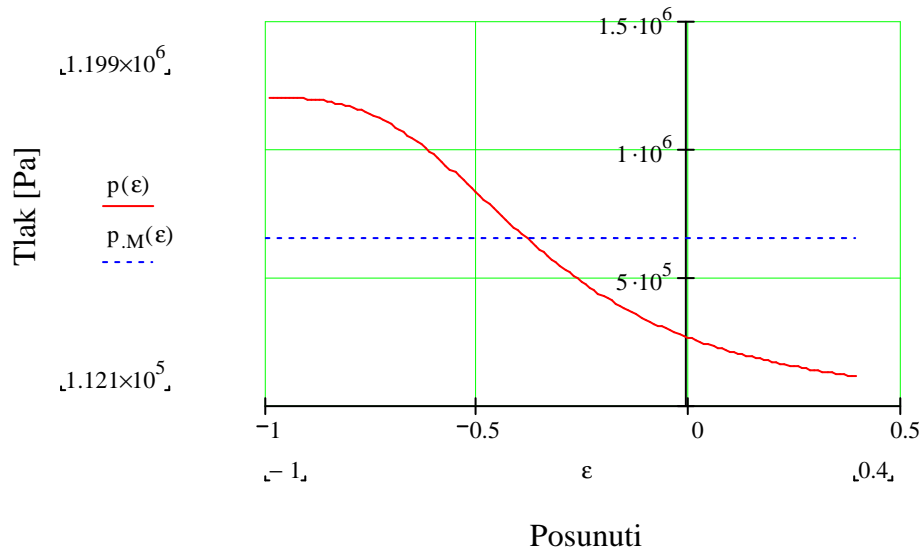
**Obr. 3 - Posunutí tělesa v ložisku**

Pro stanovení mezí zatížení ložiska je vhodné zavést tyto veličiny:

- $\Delta$  [m] ..... absolutní posunutí tělesa ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )
- $\varepsilon \in \langle \varepsilon_1; \varepsilon_2 \rangle$  ..... relativní posunutí tělesa ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )

Z tohoto **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** vyplývá:

$$h = h_0 + \Delta \dots\dots\dots ( 27 )$$



**Obr. 4 - Tlaková charakteristika ložiska s regulací GR = konst.**

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{h_0} \dots \dots \dots (28)$$

$$p = \frac{p_c}{1 + \left( \frac{p_c}{p_0} - 1 \right) \left( \frac{h}{h_0} \right)^3}$$

Dosažením do ..... (26) se stanoví:

$$p = \frac{p_c}{1 + \left( \frac{p_c}{p_0} - 1 \right) (1 + \varepsilon)^3} \dots \dots \dots (29)$$

Tento vztah určuje tlakovou charakteristiku ložiska (Obr. 4). Tato závislost je určena těmito okrajovými podmínkami:

$$\varepsilon = \varepsilon_1, p = p_M \text{ (ze vztahu } p_M = \frac{F_M}{A * k_F} \dots \dots \dots (23) \text{)}, \text{ dále}$$

$$p_0 \text{ (ze vztahu } p_0 = \frac{F_0}{A * k_F} \dots \dots \dots (22) \text{)}.$$

Dosažením těchto údajů se z tohoto vztahu odvodí potřebný tlak čerpadla:

$$p_{c1} = \frac{p_M \left( (1 + \varepsilon_1)^3 - 1 \right)}{\frac{p_M}{p_0} (1 + \varepsilon_1)^3 - 1} \dots \dots \dots (30)$$

Tlak čerpadla musí umožnit zvednutí ložiska na hodnotu vůle  $h_0$  při max. zatížení  $F_M$  tj.:

$$p_c = \max(p_{c1}, p_{cz}) \dots \dots \dots (31)$$

Kde je:

$$p_{cz} = \frac{F_M}{A_k} \dots\dots\dots (32)$$

Kde je plocha komory:

$$A_k = l_1 * b_1 \dots\dots\dots (33)$$

Vodivost kapiláry je určena součinitelem:

$$\kappa = \frac{p_c}{p_0} \dots\dots\dots (34)$$

Výraz  $p = \frac{p_c}{1 + \left(\frac{p_c}{p_0} - 1\right)(1 + \varepsilon)^3}$  ... (29) lze poté upravit na:

$$p = \frac{p_c}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (35)$$

Z tohoto výrazu lze nadále stanovit max. hodnotu relativního posunutí pro daný max. tlak.

Vodivost kapiláry se stanoví ze vztahu  $G_R = \frac{p_0}{p_c - p_0} * G_0 * k_Q = \frac{1}{\frac{p_c}{p_0} - 1} * G_0 * k_Q$  .. (25). tj.:

$$G_R = \frac{G_0}{\kappa - 1} * k_Q \dots\dots\dots (36)$$

Pro stanovenou hodnotu  $G_R$  se následně určí délka kapiláry (Obr. 5) ze vztahu:

$$G_R = \frac{\pi * d_R^4}{128 * \eta * l_R} \dots\dots\dots (37)$$

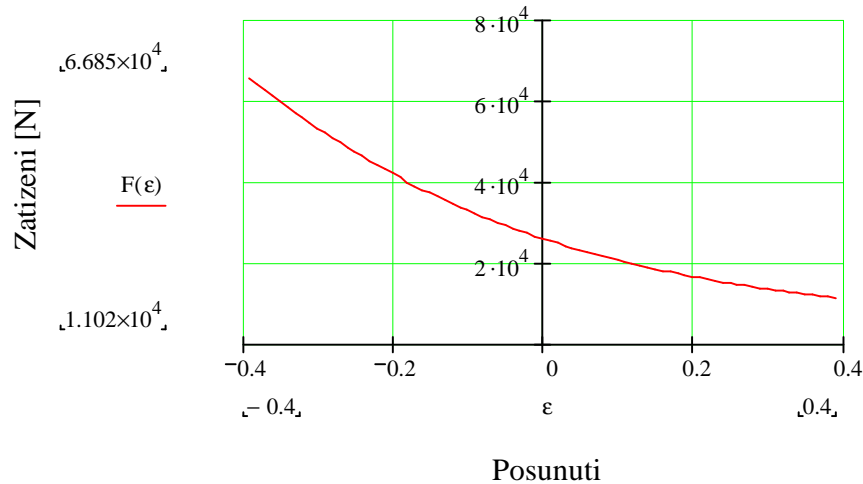
Pro daný vnitřní průměr kapiláry  $d_R$  je poté délka:

$$l_R = \frac{\pi * d_R^4}{128 * \eta * G_R} \dots\dots\dots (38)$$

Dosazením vztahu  $p = \frac{p_c}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3}$  ... (35) do  $F = p * A * k_F$  ... (14) se stanoví závislost zatížení ložiska na relativním posunutí:



**Obr. 5 – Kapilára**



**Obr. 6 - Silová charakteristika ložiska s regulací GR = konst.**

$$F = \frac{p_c * A * k_F}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots \dots \dots (39)$$

Pro mezní hodnoty posunutí  $\varepsilon$  se stanoví mezní hodnoty zatížení  $F$ .

$$F = \frac{p_c * A * k_F}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots \dots \dots (39)$$

Tuhost ložiska se stanoví derivací vztahu  $F = \dots \dots \dots (39)$  s využitím

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{h_0} \dots (28), \quad k(\varepsilon) = \frac{dF_k}{d\Delta} = -3 * p_c * A * k_F * \frac{(\kappa - 1) * (1 + \varepsilon)^2}{[1 + (\kappa - 1) * (1 + \varepsilon)^3]^2} * \frac{1}{h_0} \dots (40).$$

Pro  $\varepsilon = 0$  (tj.  $h = h_0$ ) je tuhost dána vztahem:

$$k(0) = -3 * p_c * A * k_F * \frac{(\kappa - 1)}{\kappa^2} * \frac{1}{h_0} = -3 * \frac{F_0}{h_0} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \dots \dots \dots (41)$$

Obdobně se stanoví závislost proudu na relativním posunutí dosazením

$$p = \frac{p_c}{1 + \left(\frac{p_c}{p_0} - 1\right)(1 + \varepsilon)^3} \dots \dots \dots (29) \text{ do } Q = p * G * k_Q \dots \dots \dots (13)$$

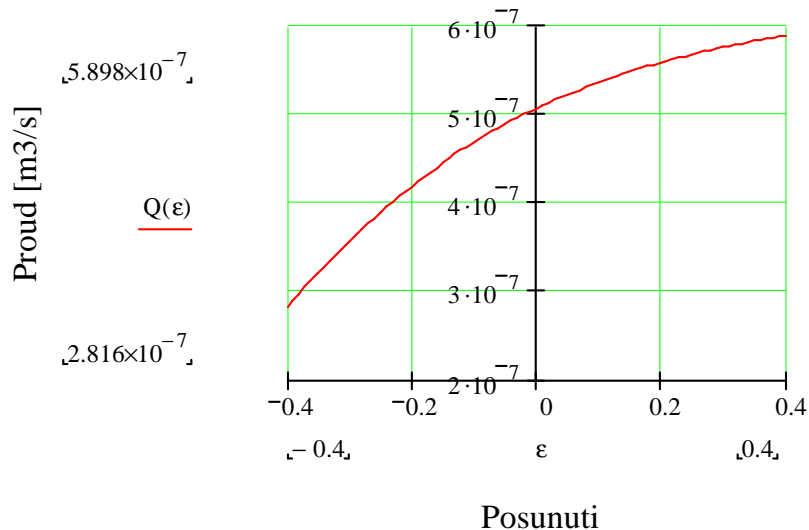
$$Q = p * G * k_Q \dots \dots \dots (13)$$

$$Q = \frac{p * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_Q \dots \dots \dots (42)$$

Pro  $\varepsilon = 0$  je  $p = p_0$  a proud:

$$Q_0 = \frac{p_0 * h_0^3}{12 * \eta} * k_Q \dots \dots \dots (43)$$

Pro mezní hodnoty posunutí  $\varepsilon \in \langle \varepsilon_1; \varepsilon_2 \rangle$  se stanoví mezní hodnoty proudu  $Q$  (Obr. 7)



**Obr. 7 - Proudová charakteristika ložiska s regulací GR = konst.**

Třecí síla ložiska se určuje pro tyto veličiny:

$E$  ..... poměrné posunutí pro zatížení  $F(\epsilon)$

$v_1$  ..... rychlost ložiska vzhledem k vedení (tj. rychlost saní) při max. zatížení  $F(\epsilon_1)$

$$F_T = \frac{A - A_k}{h_0(1 + \epsilon)} \eta * v_1 \dots \dots \dots (44)$$

Součinitel tření ve vedení je dán vztahem:

$$f_v = \frac{F_T}{F(\epsilon)} \dots \dots \dots (45)$$

Třecí výkon ložiska se přemění v teplo:

$$P_T = F_T * v_1 \dots \dots \dots (46)$$

Hydraulický výkon ložiska - přemění se v teplo:

$$P(\epsilon) = Q(\epsilon) * p(\epsilon) \dots \dots \dots (47)$$

Dosazením  $Q = \frac{p * h_0^3 * (1 + \epsilon)^3}{12 * \eta} * k_Q \dots \dots \dots (42)$ ,  $G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots \dots (21)$  a

$$p = \frac{P_c}{1 + (\kappa - 1)(1 + \epsilon)^3} \dots \dots \dots (35):$$

$$P(\epsilon) = \left( \frac{P_c}{1 - (\kappa - 1)(1 + \epsilon)^3} \right)^2 * G_0 (1 + \epsilon)^3 k_Q \dots \dots \dots (48)$$

Výkon čerpadla vztažený na 1 ložisko:

$$P_{cL} = p_c * Q(\epsilon) \dots \dots \dots (49)$$

**Př.: 1 - Charakteristika hydrostatického rovinného ložiska s regulací  $G_R = \text{konst.}$**

Dáno:

Šířka ložiska	$B_1 = 200 \text{ mm}$
Délka ložiska	$L_1 = 600 \text{ mm}$
Šířka komory	$b_1 = 143 \text{ mm}$
Délka komory	$l_1 = 543 \text{ mm}$
Předpětí ložiska	$F_0 = 26 \text{ kN}$
Max. zatížení ložiska	$F_M = 64 \text{ kN}$
Kinematická viskozita oleje	$\nu = 6,8 * 10^{-5} \text{ m}^2 * \text{s}^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,9 * 10^3 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_0$	$h_0 = 0,03 \text{ mm}$
Rozsah přípustného relativního posunutí tělesa ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )	$\varepsilon \in \langle -0,4; +0,4 \rangle$
Max. rychlost ložiska vzhledem k vedení při relativním posunutí $\varepsilon_1$	$v_1 = 10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Vnitřní průměr kapiláry	$d_R = 0,8 \text{ mm}$

Stanovit:

- Tlak oleje na čerpadle  $p_c$
- Délku kapiláry  $l_R$
- Silovou charakteristiku ložiska - max. a minimální zatížení  $F_1, F_2$
- Tlakovou charakteristiku - max. a minimální tlaky  $p_1, p_2$
- Max. hodnotu relativního posunutí  $\varepsilon_M$
- Proudovou charakteristiku ložiska - počáteční, max. a min. průtok oleje ložiskem
- $Q_0, Q_1, Q_2$
- Počáteční tuhost ložiska  $k(0)$
- Třecí sílu, součinitel tření, třecí a hydraulický výkon ložiska, výkon čerpadla vztahovaný na ložisko

$A = L_1 * B_1$  ..... ( 15 ) .... plocha ložiska:

$$A = 0,12 \text{ m}^2$$

$$k_F = \frac{L_1 * b_1 + B_1 * l_1 + 2 * B_1 * L_1 + 2 * b_1 * l_1}{6 * L_1 * B_1}$$

..... ( 19 ) .... součinitel únosnosti ložiska:

$$k_F = 0,818$$

$$p_0 = \frac{F_0}{A * k_F}$$

..... ( 22 ) .... počáteční tlak v komoře:

$$p_0 = 0,265 \text{ MPa}$$

$$p_M = \frac{F_M}{A * k_F}$$

..... ( 23 ) ... max. tlak v komoře:

$$p_M = 0,652 \text{ MPa}$$

$$\eta = \rho * \nu$$

..... ( 3 ) .... dynamická viskozita oleje:

$$\eta = 0,061 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Dosažením  $\varepsilon = \varepsilon_1 = -0,4$ ,  $p = p_M = 0,652 \text{ MPa}$ ,  $p_0 = 0,265 \text{ MPa}$  do vztahu

$$p_{c1} = \frac{p_M \left( (1 + \varepsilon_1)^3 - 1 \right)}{p_0 (1 + \varepsilon_1)^3 - 1} \dots\dots\dots (30) \text{ se určí min. hodnota tlaku čerpadla:}$$

$$p_c = 1,09 \text{ MPa}$$

Kontrola tlaku čerpadla vzhledem k zvednutí ložiska na hodnotu vůle  $h_0$  při max. zatížení  $F_M$  dle vztahů:  $A_k = l_1 * b_1 \dots\dots\dots (33)$ ,

$$A_k = 0,077 \text{ m}^2$$

$$p_{cz} = \frac{F_M}{A_k} \dots\dots (32)$$

$$P_{cz} = 0,82 \text{ MPa}$$

$$p_c = \max(p_{c1}, p_{cz}) \dots\dots\dots (31)$$

Volba tlaku čerpadla:

$$p_c = 1,1 \text{ MPa}$$

Tím je určena konstanta pro stanovení vodivosti kapiláry dle vztahů:

$$\kappa = \frac{p_c}{p_0} \dots\dots\dots (34):$$

$$\kappa = 4,15$$

Tato konstanta závisí zřejmě na poměru  $\frac{p_M}{p_0} = \frac{F_M}{F_0}$ , v případě nízkých hodnot  $\frac{p_M}{p_0}$  se volí  $\kappa \geq 1,5$ .

Max. hodnota relativního posunutí  $\varepsilon_M$  se určí ze vztahu  $p = \frac{p_c}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots (35)$  pro  $p = p_M$  a stanovené hodnoty  $p_c = 1,09 \text{ MPa}$  a  $\kappa = 4,15$  tj.:

$$\varepsilon_M = \left( \left( \frac{p_c}{p_M} - 1 \right) \frac{1}{\kappa - 1} \right)^{\frac{1}{3}} - 1$$

$$\varepsilon_M = -0,398$$

$$G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots\dots (21) \dots\dots \text{hydraulická vodivost ložiska:}$$

$$G_0 = 3,676e - 14 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}$$

$$G_R = \frac{G_0}{\kappa - 1} * k_Q \dots\dots\dots (36) \dots\dots \text{vodivost kapiláry:}$$

$$G_R = 6,036e - 13 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}$$

Kde je  $k_Q = 2 \left( \frac{L_1 + l_1}{L_1 - l_1} + \frac{B_1 + b_1}{B_1 - b_1} \right) \dots\dots\dots (12)$ .

$$l_R = \frac{\pi * d_R^4}{128 * \eta * G_R} \dots\dots (38):$$

Délka kapiláry se poté stanoví ze vztahu

$l_R = 271 \text{ mm}$
------------------------

Max. a min. tlak v komoře se stanoví pro  $\varepsilon = \varepsilon_1 = -0,4, \varepsilon = \varepsilon_2 = 0,4$ , ze vztahu

$$p = \frac{P_c}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (35):$$

$p_1 = 0,654 \text{ MPa}$
$p_2 = 0,114 \text{ MPa}$

Obdobně se stanoví max. a min. zatížení ložiska ze vztahu

$$F = \frac{p_c * A * k_F}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (39):$$

$F_1 = 64,3 \text{ kN}$
požadavek: $F_M = 64 \text{ kN}$
$F_2 = 11,2 \text{ kN}$

Tuhost ložiska při  $\varepsilon = 0$  vyplývá ze vztahu

$$k(0) = -3 * p_c * A * k_F * \frac{(\kappa - 1)}{\kappa^2} * \frac{1}{h_0} = -3 * \frac{F_0}{h_0} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \dots (41)$$

$k(0) = 1975 \text{ kN / mm}$
-------------------------------

Proud oleje procházející ložiskem se stanoví pro stavy  $\varepsilon = \varepsilon_1 = -0,4, \varepsilon = 0, \varepsilon = \varepsilon_2 = 0,4$

pomocí vztahů  $k_Q = 2 \left( \frac{L_1 + l_1}{L_1 - l_1} + \frac{B_1 + b_1}{B_1 - b_1} \right) \dots\dots\dots (12)$

$k_Q = 52,1$
--------------

a dále  $Q = \frac{p * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_Q \dots\dots\dots (42):$

$Q_1 = 0,016 \text{ l / min}$
$Q_0 = 0,03 \text{ l / min}$
$Q_2 = 0,036 \text{ l / min}$

Třecí síla ložiska ze vztahu  $F_T = \frac{A - A_k}{h_0(1 + \varepsilon)} \eta * v_1 \dots (44)$ , součinitel tření  $f_v = \frac{F_T}{F(\varepsilon)} \dots (45)$

a třecí výkon ložiska  $P_T = F_T * v_1 \dots (46)$ , hydraulický výkon ložiska  $P(\varepsilon) = Q(\varepsilon) * p(\varepsilon) \dots$

(47) i výkon čerpadla vztažený na 1 ložisko  $P_{cL} = p_c * Q(\varepsilon) \dots (49):$

$F_T = 24 \text{ N}$
$f_v = 0,0004$
$P_T = 4 \text{ W}$
$P(\varepsilon_1) = 0,18 \text{ W}$
$P_{cL} = 0,6 \text{ W}$



## 1.4 Regulace prvkem s konstantním proudem ( $Q = \text{konst.}$ )

Pro konstantní průtok do komory platí:

$$Q = p * G * k_Q \dots\dots\dots (50)$$

Kde je:

$G$  [ $\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1}$ ]..... hydraulická vodivost ložiska  
 $p$  [MPa]..... tlak oleje v komoře ložiska

Při seřizování ložiska jsou dány tyto parametry:

$h_0$  [m] ..... počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou  $F_0$

$F_0$  [N] ..... předpětí ložiska

Při zatěžování ložiska je dáno:

$F_M$  [N].....max. zatížení ložiska

Ze vztahu  $G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta}$  ..... (21), se stanoví počáteční hydraulická vodivost ložiska,

dle vztahu  $p_0 = \frac{F_0}{A * k_F}$  ..... (22) počáteční tlak v komoře,

ze vztahu  $p_M = \frac{F_M}{A * k_F}$  ..... (23) max. tlak v komoře,

ze vztahu  $Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q$  ..... (24) proud ložiska.

Dosazením do  $Q = p * G * k_Q$  ... (50) za  $Q = Q_0$ ,  $G = \frac{h^3}{12\eta}$  ..... (2), dále

$h = h_0 + \Delta$  ..... (27) a  $\varepsilon = \frac{\Delta}{h_0}$  ... (28) se stanoví:

$$p = \frac{p_0}{\left(\frac{h}{h_0}\right)^3} = \frac{p_0}{(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (51)$$

Tento vztah určuje tlakovou charakteristiku ložiska (Obr. 8). Z této závislosti se stanoví max. posunutí  $\varepsilon_M$  dosazením těchto údajů:

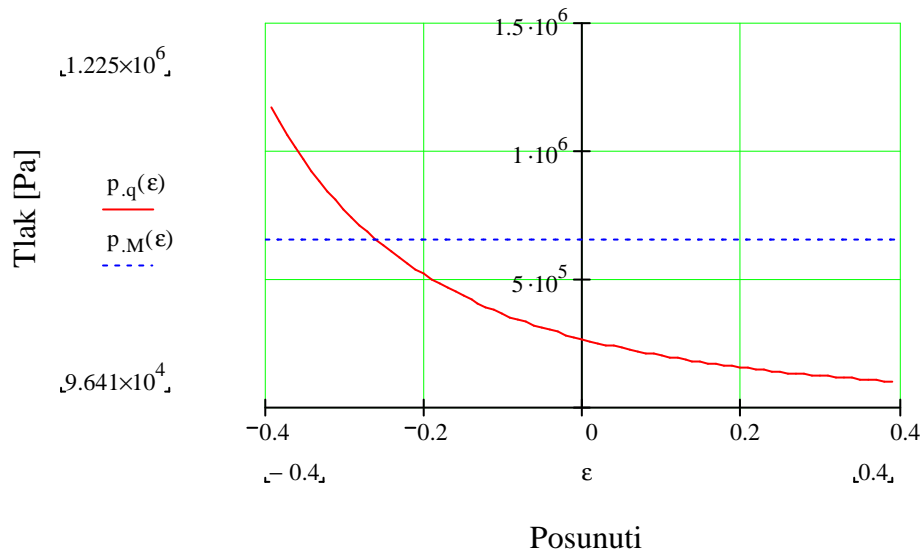
$p = p_M$  (ze vztahu  $p_M = \frac{F_M}{A * k_F}$  ..... (23)), dále

$p_0$  (ze vztahu  $p_0 = \frac{F_0}{A * k_F}$  ..... (22)):

$$\varepsilon_M = \left(\frac{p_0}{p_M}\right)^{\frac{1}{3}} - 1 \dots\dots\dots (52)$$

Krajní hodnoty relativního posunutí tělesa ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )  $\varepsilon \in \langle \varepsilon_1; \varepsilon_2 \rangle$  se následně stanoví takto:

$\varepsilon_1 < \varepsilon_M$  .....zaokrouhlení na 1. desetinné místo  
 $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$



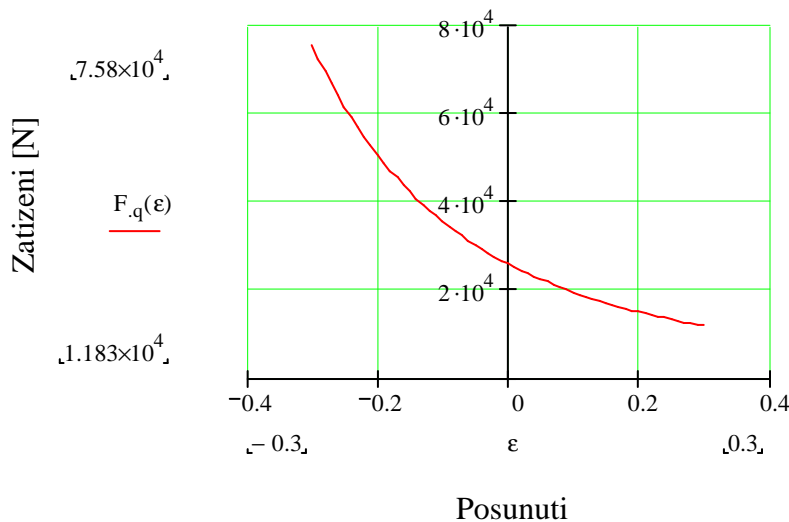
**Obr. 8 - Tlaková charakteristika ložiska s regulací Q = konst.**

$$p = \frac{P_0}{\left(\frac{h}{h_0}\right)^3} = \frac{P_0}{(1 + \varepsilon)^3}$$

Dosažením vztahu ..... ( 51 ) do  $F = p * A * k_F$  ... ( 14 )  
se stanoví zatížení ložiska na relativním posunutí:

$$F = \frac{P_0 * A * k_F}{(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots ( 52 )$$

Pro mezní hodnoty posunutí  $\varepsilon$  se stanoví mezní hodnoty zatížení  $F$ .



**Obr. 9 - Silová charakteristika ložiska s regulací Q = konst.**

Tuhost ložiska se stanoví derivací vztahu  $F = \frac{P_0 * A * k_F}{(1 + \varepsilon)^3}$  ..... ( 53 ) a  $\varepsilon = \frac{\Delta}{h_0}$  .... ( 28 )

$$k(\varepsilon) = \frac{dF_k}{d\Delta} = -3 * \frac{p_0 * A * k_F}{(1 + \varepsilon)^4 * h_0} \dots\dots\dots (53)$$

Pro  $\varepsilon = 0$  (tj.  $h = h_0$ ) je tuhost dána vztahem:

$$k(0)_Q = -3 * p_0 * A * k_F * \frac{1}{h_0} = -3 * \frac{F_0}{h_0} \dots\dots\dots (54)$$

Z porovnání se vztahem pro tuhost ložiska s regulací  $G_R = \text{konst}$  vyplývá:

$$\frac{k(0)_Q}{k(0)} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \dots\dots\dots (55)$$

Tuhost ložiska s regulací  $Q = \text{konst.}$  je zřejmě větší než ložiska s regulací  $G_R = \text{konst.}$  Při shodném předpětí  $F_0$ .

**Tlak čerpadla**

Pro regulaci  $Q = \text{konst.}$  se obvykle používají proudové ventily. Jejich funkce je podmíněna minimálním tlakovým spádem 1MPa tj. tlak čerpadla je dán vztahem:

$$p_c = p(\varepsilon_1) + 1MPa \dots\dots\dots (56)$$

**Př.: 2 - Charakteristika hydrostatického rovinného ložiska s regulací  $Q = \text{konst.}$**

Dáno:

Šířka ložiska	$B_1 = 200 \text{ mm}$
Délka ložiska	$L_1 = 600 \text{ mm}$
Šířka komory	$b_1 = 143 \text{ mm}$
Délka komory	$l_1 = 543 \text{ mm}$
Předpětí ložiska	$F_0 = 26 \text{ kN}$
Max. zatížení ložiska	$F_M = 64 \text{ kN}$
Kinematická viskozita oleje	$\nu = 6,8 * 10^{-5} \text{ m}^2 * \text{s}^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,9 * 10^3 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_{k0}$	$h_0 = 0,03 \text{ mm}$

Stanovit:

- Tlak oleje na čerpadle  $p_c$
- Silovou charakteristiku ložiska - max. a minimální zatížení  $F_1, F_2$
- Max. hodnotu relativního posunutí  $\varepsilon_M$
- Tlakovou charakteristiku - max. a minimální tlaky  $p_1, p_2$
- Proud ložiska -  $Q_0$
- Počáteční tuhost ložiska  $k(0)_Q$  a porovnání s tuhostí ložiska  $k(0)$  s regulací  $G_R = \text{konst}$

Shodně jako u ložiska s regulací  $G_R = \text{konst.}$

$$A = L_1 * B_1 \dots\dots\dots (15) \dots \text{plocha ložiska:}$$

$$A = 0,12 \text{ m}^2$$

$$k_F = \frac{L_1 * b_1 + B_1 * l_1 + 2 * B_1 * L_1 + 2 * b_1 * l_1}{6 * L_1 * B_1} \dots\dots (19) \dots\dots \text{součinitel únosnosti ložiska:}$$

$$k_F = 0,818$$

$$p_0 = \frac{F_0}{A * k_F} \dots\dots\dots (22) \text{ počáteční tlak v komoře:}$$

$$p_0 = 0,265 \text{ MPa}$$

$$p_M = \frac{F_M}{A * k_F} \dots\dots\dots (23) \dots \text{max. tlak v komoře:}$$

$$p_M = 0,652 \text{ MPa}$$

$$\eta = \rho * \nu \dots\dots\dots (3) \dots \text{dynamická viskozita oleje:}$$

$$\eta = 0,061 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Ze vztahu  $G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots\dots\dots (21)$  se stanoví počáteční hydraulická vodivost ložiska,

ze vztahu  $k_Q = 2 \left( \frac{L_1 + l_1}{L_1 - l_1} + \frac{B_1 + b_1}{B_1 - b_1} \right) \dots\dots\dots (12)$  se stanoví součinitel průtoku ložiskem a

poté ze vztahu  $Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q \dots\dots\dots (24)$  proud ložiska:

$$Q_0 = 0,03 \text{ l/min}$$

Volba regulačního prvku z katalogu [ 4]:

Regulační ventil	2 FRM6A
Regulační rozsah proudu	$q_v = 0,015 - 0,2 \text{ l/min}$

$$\varepsilon_M = \left( \frac{p_0}{p_M} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \dots\dots\dots (52):$$

$$\varepsilon_M = -0,259$$

Krajní hodnoty relativního posunutí tělesa ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )  $\varepsilon \in \langle \varepsilon_1; \varepsilon_2 \rangle$  se poté stanoví takto:

$$\varepsilon = \langle -0,3; +0,3 \rangle$$

$$p = \frac{p_0}{\left( \frac{h}{h_0} \right)^3} = \frac{p_0}{(1 + \varepsilon)^3}$$

Dosažením krajních hodnot  $\varepsilon$  do tlaku v komoře ložiska:  $\dots\dots\dots (51)$  se stanoví krajní hodnoty

$$p_1 = 0,77 \text{ MPa}$$

$$p_2 = 0,1 \text{ MPa}$$

Obdobně se stanoví hodnoty zatížení ložiska ze vztahu  $F = p * A * k_F \dots\dots (14)$ :

$$F_1 = 76 \text{ kN}$$

$$F_2 = 11,8 \text{ kN}$$

Tuhost při  $\varepsilon = 0$  vyplývá ze vztahu  $k(0)_Q = -3 * p_0 * A * k_F * \frac{1}{h_0} = -3 * \frac{F_0}{h_0} \dots (55)$ :

$$k(0)_Q = 2600 \text{ kN/mm}$$

Porovnání tuhostí dle vztahu  $\frac{k(0)_Q}{k(0)} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \dots\dots\dots (56)$ :

$$\frac{k(0)_e}{k(0)} = \frac{4,15}{3,15} = 1,31$$

Tlak čerpadla při užití proudového ventilu je dán vztahem

$$p_c = p(\varepsilon_1) + 1 \text{MPa} \dots\dots\dots (57):$$

$$p_c = 1,7 \text{MPa}$$

### 1.5 Vliv změny teploty na charakteristické parametry ložiska

Při nárůstu teploty viskozita oleje klesá, což při dané tloušťce olejového filmu ovlivňuje

$$G = \frac{h^3}{12\eta}$$

vodivost spáry ložiska dle vztahu .... (2). K tomuto jevu dochází především při rozběhu stroje, když se počáteční nízká teplota odpovídající okolí zvyšuje na provozní hodnotu.

#### 1.5.1 Systém s kapilárou (konstantní hydraulická vodivost $G_R = \text{konst.}$ )

Ze vztahů  $(p_c - p) * G_R = Q_k = p * G * k_Q \dots\dots\dots (20)$ ,  $G = \frac{h^3}{12\eta} \dots\dots\dots (2)$ ,

$$G_R = \frac{\pi * d_R^4}{128 * \eta * l_R} \dots\dots\dots (37) \text{ vyplývá:}$$

$$h^3 = \frac{12\eta}{k_Q} \left( \frac{p_c}{p} - 1 \right) * \frac{\pi d_R^4}{128\eta * l_R}$$

V tomto výrazu se zřejmě zkrátí  $\eta$ ,  $p = \text{konst}$  dle  $F = p * A * k_F \dots\dots\dots (14)$  tj.:  $h = \text{konst.}$  – nedojde tedy ke změně tloušťky olejového filmu při změně viskozity.

#### 1.5.2 Systém s regulací prvkem s konstantním proudem ( $Q = \text{konst}$ )

Ze vztahů  $Q = p * G * k_Q \dots\dots\dots (50)$ ,  $G = \frac{h^3}{12\eta} \dots\dots\dots (2)$ ,

pro  $Q = Q_0 = \text{konst}$ ,  $p = \text{konst.}$  se stanoví:

$$h^3 = \frac{12\eta * Q_0}{p * k_Q}$$

Z tohoto výrazu vyplývá, že změna viskozity způsobí změnu tloušťky olejového filmu. Vzhledem k tomu, že viskozita závisí na teplotě, dochází během náběhu hydrostatiky na provozní teplotu k poklesu tloušťky olejového filmu a tím ke změně polohy skupiny uložené na hydrostatickém vedení.

Ze předchozích vztahů vyplývá po dosazení výrazu pro vodivost při teplotách  $t_1$ ,  $t_2$ :

$$Q = p * G_{t_1} * k_Q = p * G_{t_2} * k_Q$$

$$G_{t_1} = G_{t_2}$$

$$\frac{12\rho v_{t_1}}{h_{t_1}^3} = \frac{12\rho v_{t_2}}{h_{t_2}^3}$$

$$\frac{h_{t2}^3}{h_{t1}^3} = \frac{v_{t2}}{v_{t1}} \dots\dots\dots ( 57 )$$

### 1.6 Optimální rozměry rovinného hydrostatického ložiska obdélníkového tvaru

Projekt stroje určuje druhy vedení (kluzné, valivé a hydrostatické), počet drah jednotlivých vedení a jejich rozměry. Pro přímočaré vedení otočného stolu (Obr. 10) je to:

- $i = 2$  ..... počet druhů: vedení valivé (rov. Y, Z), vedení hydrostatické (rov. X, Y)
- $n_D = 5$  ..... počet drah hydrostatického vedení
- $L_v$  [m] ..... délka dráhy hydrostatického vedení
- $B_l$  [m] ..... šířka dráhy hydrostatického vedení tj. šířka hydrostatického ložiska
- $n_K = 4 - 5$  ..... počet hydrostatických ložisek na 1 dráze

Z těchto údajů se stanoví:

- délka ložiska

$$L_1 = \frac{L_v}{n_K} \dots\dots\dots ( 58 )$$

- součinitel vnějších rozměrů ložiska

$$\delta = \frac{B_1}{L_1} \dots\dots\dots ( 59 )$$

**Tab. 1 - Optimální šířka komory [ 9]**

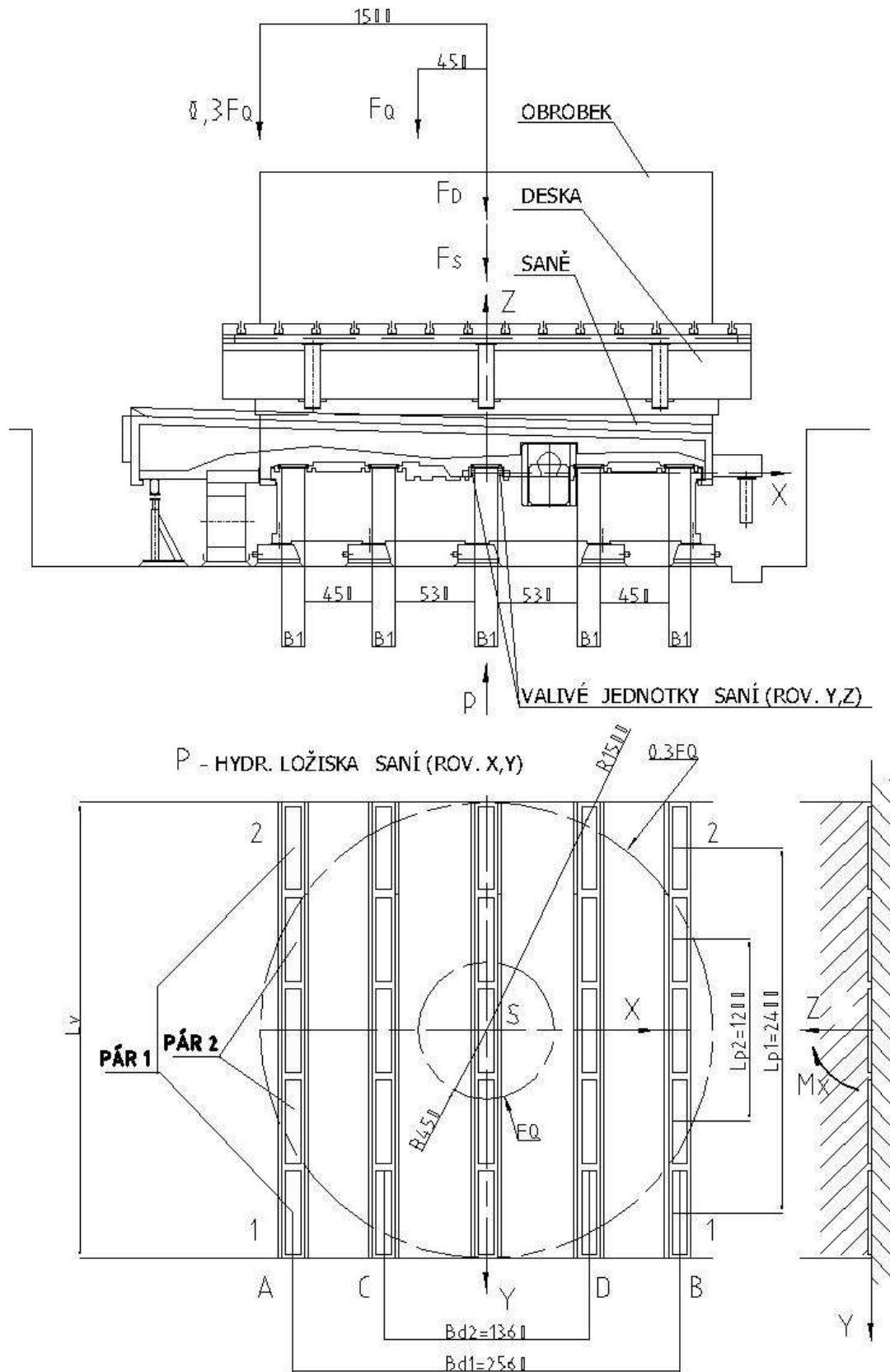
$\delta = \frac{B_1}{L_1}$	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$
$\lambda = \frac{b_1}{B_1}$	0,57	0,49	0,45	0,42	0,42	0,39

- součinitel šířky komory ložiska

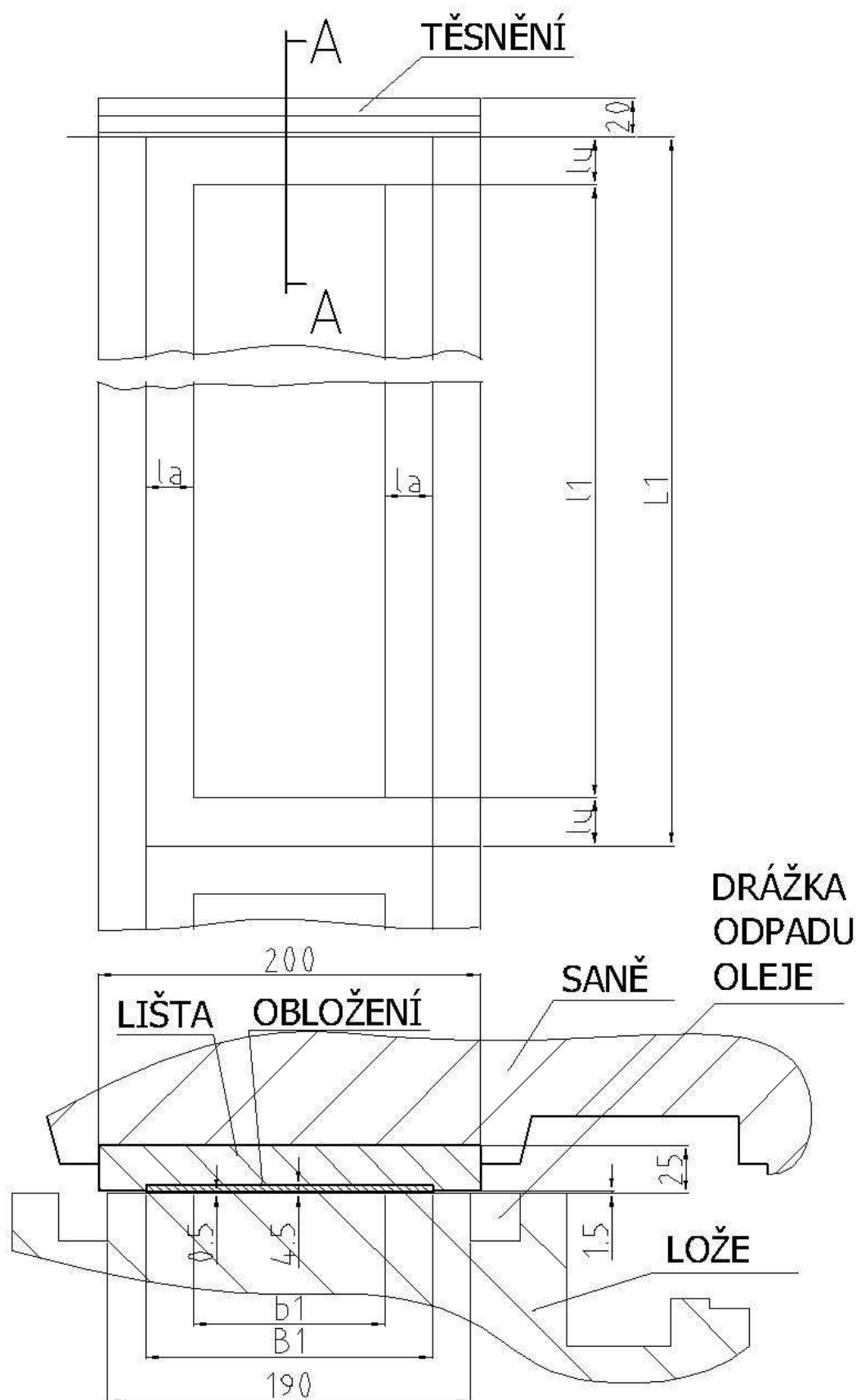
$$\lambda = \frac{b_1}{B_1} \dots\dots\dots ( 60 )$$

Z tohoto vztahu a hodnoty  $\lambda$  z

Tab. 1 se následně stanoví optimální šířka komory  $b_1$ . Kriteřiem pro optimalizaci je minimální hydraulický výkon ložiska.

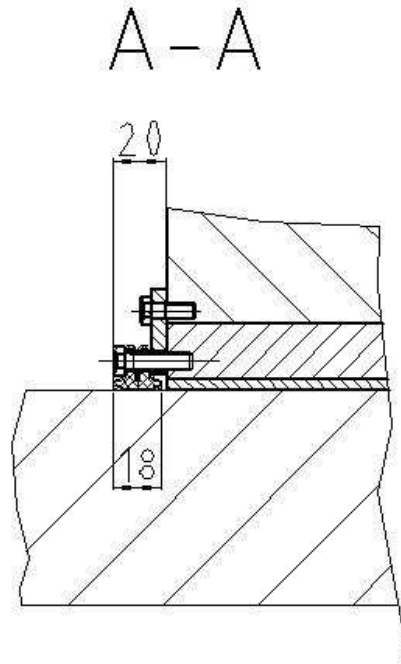


Obr. 10 - Hydrostatické vedení saní otočného stolu [ 5 ]



Obr. 11- Hydrostatické ložisko rovinné-optimalizace rozměrů





**Obr. 12 - Těsnění rovinného hydrostatického ložiska**

Ze vztahů  $l_a = \frac{B_1 - b_1}{2}$  ... (4),  $l_u = \frac{L_1 - l_1}{2}$  .....(5) a  $l_a = l_u$  se stanoví délka komory:

$$l_1 = L_1 - B_1 + b_1 \dots \dots \dots (61)$$

Obvykle se olej z hydrostatických ložisek odvádí do odpadních drážek v loži (Obr. 11), čelní plochy ložisek se utěšňují (Obr. 12).

**Př.: 3 - Optimalizace rovinného ložiska pro přímočaré vedení**

Dáno:

Délka vedení	$L_v = 3\ 000\ mm$
Šířka ložiska	$B_l = 150\ mm$
Počet ložisek na vodící dráze	$n_K = 5$

Obr. 10-Hydrostatické vedení saní otočného stolu [ 5]

Obr. 11- Hydrostatické ložisko rovinné-optimalizace rozměrů

Stanovit:

- rozměry ložiska  $L_l$ ,  $b_l$ , součinitele únosnosti  $k_F$  a vodivosti ložiska  $k_Q$  a plochu ložiska  $A_l$

$$Z \quad L_l = \frac{L_v}{n_K} \dots \dots \dots (59):$$

$L_l = 600\ mm$

$$Z \quad \delta = \frac{B_l}{L_l} \dots \dots \dots (60)$$

$$\lambda = \frac{b_l}{B_l} \dots \dots \dots (61)$$

$\delta = 0,25$

Z

Tab. 1:

	$\lambda = 0,394$
Z $\lambda = \frac{b_1}{B_1}$ ..... ( 61 ):	
$b_1 = \lambda * B_1$ ..... ( 62 )	$b_1 = 59 \text{ mm}$
Z $l_1 = L_1 - B_1 + b_1$ ..... ( 62 ):	$l_1 = 510 \text{ mm}$
Z $A = L_1 * B_1$ ..... ( 15 ):	$A = 0,09 \text{ m}^2$
Z $k_Q = 2 \left( \frac{L_1 + l_1}{L_1 - l_1} + \frac{B_1 + b_1}{B_1 - b_1} \right)$ .....( 12 ) a	
$k_F = \frac{L_1 * b_1 + B_1 * l_1 + 2 * B_1 * L_1 + 2 * b_1 * l_1}{6 * L_1 * B_1}$ .....( 19 ):	$k_Q = 29$
	$k_F = 0,652$

### 1.7 Stanovení zatížení ložiska z celkového zatížení vedení

Zatížení ložiska se určuje z těchto předpokladů:

- Počátek soustavy souřadnic vedení (X, Y, Z) je umístěn ve středu pružnosti rovinných ložisek - těžišti obrazce (Obr. 10)
- Zatížení se člení na konstantní, které vytvářejí předpětí a proměnné. Působíště sil je obecně mimo střed pružnosti.

#### Př.: 4 - Zatížení rovinného hydrostatického ložiska

Dáno:

Tíha saní stolu	$F_S = 100 \text{ kN}$
Tíha desky stolu	$F_D = 550 \text{ kN}$
Působíště předepínacích sil je ve středu pružnosti obrazce ložisek	$r_I = 0 \quad 0 \quad 0$
Proměnné zatížení:	
• Max. tíha obrobku	$F_Q = 950 \text{ kN}$
• Vektor tíhy obrobku	$F_2 = 0 \quad 0 \quad -F_Q$
• Působíště tíhy obrobku	$r_2 = -450 \quad 0 \quad 0 \text{ mm}$
Počet ložisek na vodící dráze	$n = 5$
Počet vodících drah	$n_D = 5$
Rozměry a součinitelé ložiska	Př. 3
Obr. 10 - Hydrostatické vedení saní otočného stolu [ 5]	
Obr. 11- Hydrostatické ložisko rovinné-optimalizace rozměrů	

Stanovit:

- Silové a tlakové předpětí ložiska  $F_0, p_0$
- Silové a tlakové zatížení ložiska – max.  $F_M, p_M, \min.F_m, p_m$

Předpětí vodicích drah:

$$F_{0c} = F_S + F_D \dots \dots \dots (63)$$

$F_{0c} = 650kN$
------------------

Předpětí ložiska:

$$F_0 = \frac{F_{0c}}{n * n_D} \dots \dots \dots (64)$$

$$p_0 = \frac{F_0}{A * k_F} \dots \dots \dots (22)$$

$F_0 = 26kN$
$p_0 = 0,45MPa$

Pozn.: Předpětí není ovlivňováno klopným momentem s ohledem na  $r_I = 0 \ 0 \ 0$ .

Proměnné zatížení vodicích drah:

- Zatížení vektorem proměnné síly

$F_2 = 0 \ 0 \ -950kN$
------------------------

- Zatížení klopným momentem

$$M_2 = r_2 * F_2 \dots \dots \dots (65)$$

$M_2 = 0 \ -427,5 \ 0kNm$
---------------------------

Zatížení krajních ložisek drah A, B, C, D od složky  $M_x$  vektoru  $M_2$ :

$$F_{Mx} = \frac{M_{2x}}{n_D} \frac{L_{p1}}{L_{p1}^2 + L_{p2}^2} \dots \dots \dots (66)$$

$F_{Mx} = 0$
--------------

Zatížení drah A, B od složky  $F_z$  vektoru  $F_2$  a složky  $M_y$  vektoru  $M_2$ :

$$F_A = \frac{F_z}{n_D} + M_y \frac{B_{D1}}{B_{D1}^2 + B_{D2}^2} \dots \dots \dots (67)$$

$F_A = -320,2kN$
------------------

$$F_B = \frac{F_z}{n_D} - M_y \frac{B_{D1}}{B_{D1}^2 + B_{D2}^2} \dots \dots \dots (68)$$

$F_B = -59,7kN$
-----------------

Zatížení koncových protilehlých ložisek dráhy A:

$$F_{A1} = \frac{F_A}{n} + F_{Mx} \dots \dots \dots (69)$$

$F_{A1} = -64kN$
------------------

$$F_{A2} = \frac{F_A}{n} - F_{Mx} \dots \dots \dots (70)$$

$$F_{A2} = -64 \text{ kN}$$

Zatížení koncových protilehlých ložisek dráhy B:

$$F_{B1} = \frac{F_B}{n} + F_{Mx} \dots\dots\dots (71)$$

$$F_{B1} = -12 \text{ kN}$$

$$F_{B2} = \frac{F_B}{n} - F_{Mx} \dots\dots\dots (72)$$

$$F_{B2} = -12 \text{ kN}$$

Max. a min. hodnoty proměnného zatížení ložiska:

- Max. zatížení

$$F_{\max} = \min(F_{A1}, F_{B1}) \dots\dots\dots (73)$$

$$F_{\max} = -64 \text{ kN}$$

- Min. zatížení

$$F_{\min} = \max(F_{A1}, F_{B1}) \dots\dots\dots (74)$$

$$F_{\min} = -12 \text{ kN}$$

Max. a min. hodnoty celkového zatížení ložiska:

- Max. zatížení

$$F_M = F_0 - F_{\max} \dots\dots\dots (75)$$

$$F_M = 90 \text{ kN}$$

- Min. zatížení

$$F_m = F_0 - F_{\min} \dots\dots\dots (76)$$

$$F_m = 38 \text{ kN}$$

Max. tlak v ložisku je poté dán vztahem  $p_M = \frac{F_M}{A * k_F} \dots\dots (23)$

$$p_M = 4,5 \text{ MPa}$$

Obdobně při dosazení  $F_m$ :

$$p_m = 4,5 \text{ MPa}$$

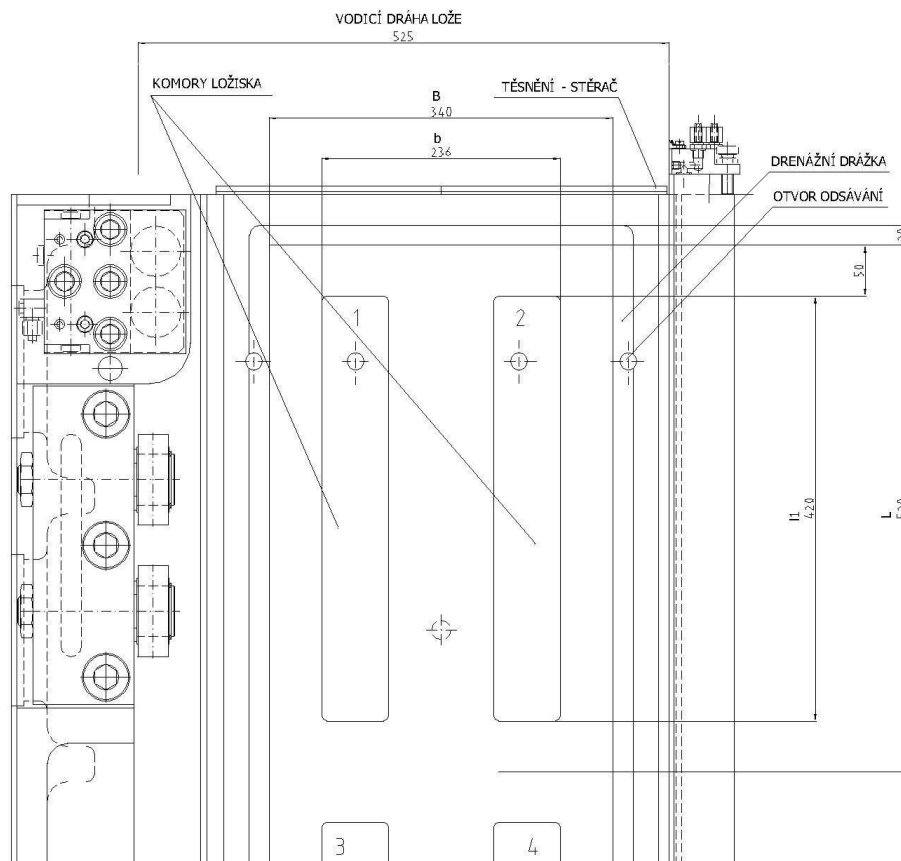
### 1.8 Hydrostatická rovinná ložiska s odsáváním odpadního oleje

Ložiska s odpadem oleje do drážek lože (Obr. 11) jsou jednoduchá – olej vytékající z ložisek se svádí drážkami do nádrže přečerpávacího agregátu a odtud pak přes filtraci do vlastního agregátu hydrostatiky. Odpadní olej je chráněn teleskopickým krytím proti průniku nečistot a chladicí kapaliny z pracovního prostředí. Ochrana proti pronikání řezné kapaliny je však často neúčinná, kapalina se mísí s olejem a způsobuje přepřívání nádrže agregátu hydrostatiky.

Tato závada se odstraní separací oleje od řezné kapaliny v hydraulickém agregátu což, však zvýší jeho technickou náročnost.

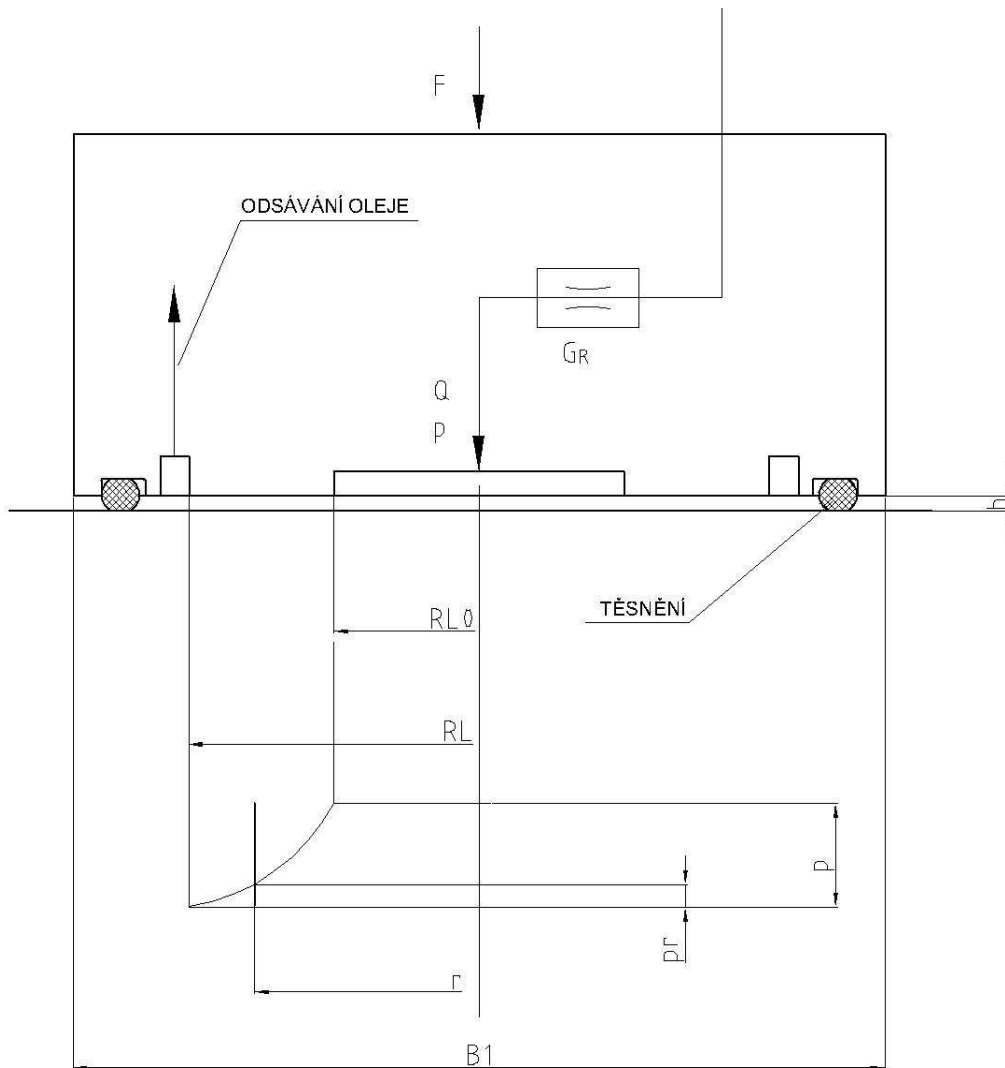
Řešením tohoto problému je konstrukce ložiska s odsáváním odpadního oleje. Existují tyto konstrukce:

- Drenážní drážka okolo všech ložisek bez těsnění vzhledem k okolí – nedostatkem je únik části oleje z drenážní drážky ložisek do svodových drážek lože
- Drenážní drážka kolem všech ložisek s těsněním vzhledem k okolí – odstraňuje nedostatek předchozího řešení – při obdélníkovém tvaru drenážní drážky se těsnění vyrábí slepením 4 přímých úseků stěrače [ 2] což zvyšuje pracnost a tím náklady
- Drenážní drážka kolem každého ložiska s těsněním vzhledem k okolí (Obr. 14) – těsnění je normalizované [ 1], ložiska jsou proto kruhového tvaru



**Obr. 13 - Ložiska se společnou drenážní drážkou**

### 1.9 Hydrostatické rovinné ložisko kruhového tvaru



**Obr. 14 - Hydrostatické ložisko kruhového tvaru s těsněním**

Hydrostatické ložisko kruhového tvaru (Obr. 14) je určeno těmito rozměry:

- $R_{L0}$  [m]..... minimální poloměr ložiska
- $R_L$  [m]..... poloměr ložiska

Poté platí pro plochy:

$$A = \pi R_L^2 \dots\dots\dots (77)$$

$$A_k = \pi R_{L0}^2 \dots\dots\dots (78)$$

Pro přehlednost se zavede vztah pro poměr jmenovitého k minimálnímu poloměru ložiska:

$$\rho_L = \frac{R_L}{R_{L0}} \dots\dots\dots (79)$$

Pro průtočné množství platí vztah:

$$Q = G * b * \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots (80)$$

Do tohoto vztahu se dosadí:

$$x = r$$

$$b = 2\pi * r$$

Z výsledného výrazu se odvodí integrací tlak  $p_r$  v místě  $r$  a v komoře  $p$ :

$$p_r = \frac{Q}{G} * \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{R_L}{r} \dots\dots\dots (81)$$

$$p = \frac{Q}{G} * \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{R_L}{R_{L1}} = \frac{Q}{G} * \frac{1}{2\pi} * \ln \rho_L \dots\dots\dots (82)$$

Zatížení ložiska je dáno vztahem:

$$F = p * \pi * R_{L1}^2 + 2\pi * \int_{R_{L0}}^{R_L} p_r * r * dr \dots\dots\dots (83)$$

Po dosazení se stanoví:

$$F = p * \frac{\pi}{2} * \frac{R_L^2 - R_{L0}^2}{\ln \frac{R_L}{R_{L0}}} = p * \frac{A}{2} * \frac{1 - \frac{1}{\rho_L^2}}{\ln \rho_L} \dots\dots\dots (84)$$

Při využití vztahu  $F = p * A * k_F \dots\dots (14)$ ,  $k_F = \frac{A_e}{A} \dots\dots (16)$  a výrazu pro celkovou plochu ložiska  $A = \pi R_L^2 \dots\dots (78)$  se stanoví součinitel únosnosti ložiska:

$$k_F = \frac{1 - \frac{1}{\rho_L^2}}{2 \ln \rho_L} \dots\dots\dots (85)$$

poté lze využít vztahy  $p_0 = \frac{F_0}{A * k_F} \dots\dots (22)$  a  $p_M = \frac{F_M}{A * k_F} \dots\dots (23)$

Z  $p = \frac{Q}{G} * \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{R_L}{R_{L1}} = \frac{Q}{G} * \frac{1}{2\pi} * \ln \rho_L \dots\dots\dots (83)$  se odvodí:

$$Q = p * G * \frac{2\pi}{\ln \rho_L} \dots\dots\dots (86)$$

Z vztahu  $Q = p * G * k_Q \dots\dots\dots (13)$

se určí součinitel průtoku ložiskem:

$$k_Q = \frac{2\pi}{\ln \rho_L} \dots\dots\dots (87)$$

Optimalizace rozměrů ložiska se provádí podle kriteria minimálního ztrátového výkonu, který je dán vztahy:

$$F_T = \frac{A - A_k}{h_0(1 + \varepsilon)} \eta * v_1 \dots\dots\dots (44), \text{ tento vztah se upraví dosazením } A = \pi R_L^2 \dots (78) \text{ a}$$

$$A_k = \pi R_{L0}^2 \dots\dots\dots (79) \text{ tj.:$$

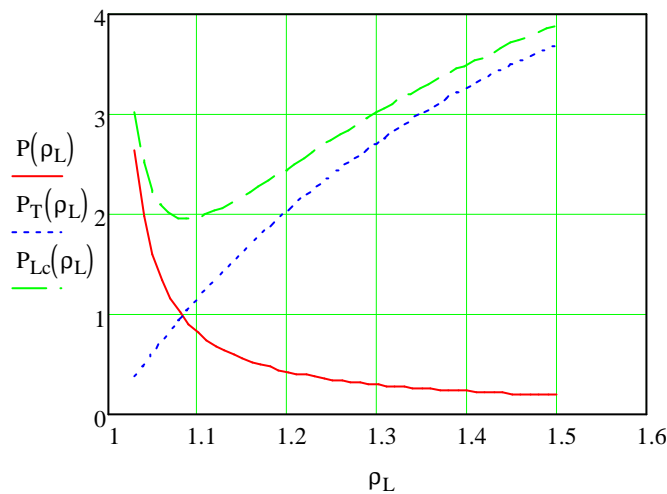
$$F_T = \frac{1 - \frac{1}{\rho_L^2}}{h_0(1 + \varepsilon)} A * \eta * v_1 \dots\dots\dots (88)$$

$$P_T = F_T * v_1 \dots\dots\dots (46), \quad P(\varepsilon) = \left( \frac{P_c}{1 - (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3} \right)^2 * G_0(1 + \varepsilon)^3 k_Q \dots\dots\dots (48)$$

$$k_Q = \frac{2\pi}{\ln \rho_L} \dots\dots\dots (88).$$

Celkový ztrátový výkon v ložisku při posunutí  $\varepsilon_1$ , který závisí na  $\rho_L$  je dán vztahem:

$$P_{Lc}(\rho_L) = P_T(\rho_L) + P(\rho_L) = \eta * v_1^2 * A * \frac{1 - \frac{1}{\rho_L^2}}{h_0(1 + \varepsilon)} + \left( \frac{P_c}{1 - (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3} \right)^2 * G_0(1 + \varepsilon)^3 * \frac{2\pi}{\ln \rho_L} \dots\dots\dots (89)$$



**Obr. 15 - Ztrátový výkon ložiska v závislosti na  $\rho_L = \frac{R_L}{R_{L1}}$**

Z grafu na Obr. 15 je zřejmý optimální poměr v rozsahu  $\rho_L \in (1,1;1,4)$ , který lze využít pro úvodní návrh ložiska. Přesná hodnota  $\rho_L$  se stanoví nalezením extrému tj.:

$$\frac{dP_{Lc}}{d\rho_L} = 0$$

který vede ke vztahu:

$$C * \ln \rho_L = \rho_L \dots\dots\dots (90)$$



Kde je:

$$C = \frac{v_1 * \sqrt{\eta * A \frac{2}{h_0(1+\varepsilon)}}}{\frac{p_c}{1+(\kappa-1)(1+\varepsilon)^3} * \sqrt{2\pi * G_0(1+\varepsilon)^3}}$$

**Př.: 5 - Charakteristika hydrostatického rovinného ložiska kruhového tvaru s regulací**  
 **$G_R = \text{konst.}$**

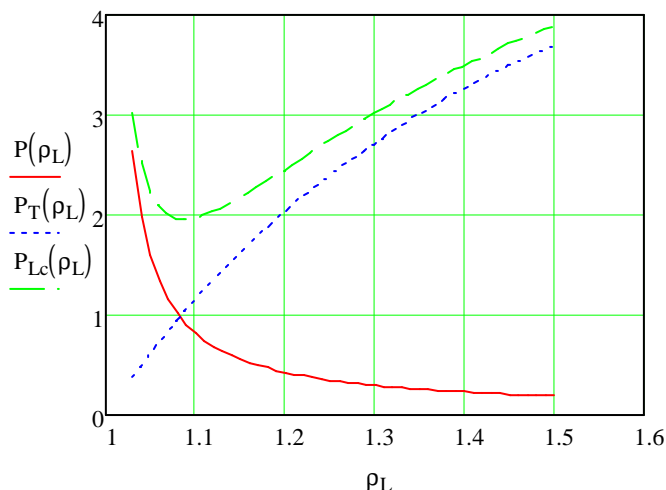
Dáno:

Šířka vedení	$B_1 = 200 \text{ mm}$
Délka ložiska	$L_1 = 200 \text{ mm}$
Poloměr ložiska (vnitřní poloměr odpadní drážky)	$R_L = 150 \text{ mm}$
Předpětí ložiska	$F_0 = 20 \text{ kN}$
Max. zatížení ložiska	$F_M = 60 \text{ kN}$
Kinematická viskozita oleje	$\nu = 6,8 * 10^{-5} \text{ m}^2 * \text{s}^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,9 * 10^3 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_{k0}$	$h_0 = 0,03 \text{ mm}$
Rozsah relativního posunutí tělesa ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )	$\varepsilon \in \langle -0,4; +0,4 \rangle$
Max. rychlost ložiska vzhledem k vedení při relativním posunutí $\varepsilon_1$	$v_1 = 10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Vnitřní průměr kapiláry	$d_R = 0,8 \text{ mm}$
Obr. 14 - Hydrostatické ložisko kruhového tvaru s těsněním	

Stanovit:

- Tlak oleje na čerpadle  $p_c$
- Silovou charakteristiku ložiska - max. a minimální zatížení  $F_1, F_2$
- Tlakovou charakteristiku - max. a minimální tlaky  $p_1, p_2$
- Proudovou charakteristiku ložiska – počáteční průtok oleje ložiskem  $Q_0$
- Počáteční tuhost ložiska  $k(0)$

Z grafu na )



Obr. 15 - Ztrátový výkon ložiska v závislosti na  $\rho_L = \frac{R_L}{R_{L1}}$  se zvolí:

$\rho_L = 1,4$

Ze vztahu  $k_F = \frac{1 - \frac{1}{\rho_L^2}}{2 \ln \rho_L}$  ..... ( 86 )

a vztahu  $k_Q = \frac{2\pi}{\ln \rho_L}$  ..... ( 88 ) se poté stanoví:

$k_F = 0,728$
$k_Q = 18,6$

Ze vztahu  $\rho_L = \frac{R_L}{R_{L0}}$  ..... ( 80 ) se stanoví:

$R_{L0} = 107mm$
------------------

Ze vztahu  $A = \pi R_L^2$  ..... ( 78 ) se určí:

$A = 0,07m^2$
---------------

Ze vztahů  $p_0 = \frac{F_0}{A * k_F}$  ..... ( 22 ) a  $p_M = \frac{F_M}{A * k_F}$  .... ( 23 ) se stanoví předpětí a max. tlak v komoře:

$p_0 = 0,38 MPa$
$p_M = 1,16 MPa$

Ze vztahu  $G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta}$  ..... ( 21 ) a  $Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q$  ..... ( 24 ) se stanoví proud ložiska:

$Q_0 = 0,016 l/min$
---------------------

Při regulaci kapilárou se určí dosazením  $\varepsilon = \varepsilon_1 = -0,4$ ,  $p = p_M$  a  $p_0$  do vztahu

$$p_{c1} = \frac{p_M \left( (1 + \varepsilon_1)^3 - 1 \right)}{\frac{p_M}{p_0} (1 + \varepsilon_1)^3 - 1}$$

..... ( 30 ) min. hodnota tlaku čerpadla, po zaokrouhlení:

$p_{c1} = 2,7 MPa$
--------------------

Kontrola tlaku čerpadla při zvedání saní ze stavu bez vůle (dosed):

$$p_{cz} = \frac{F_M}{A_k}$$

..... ( 32 )

$$p_c = \max(p_{c1}, p_{cz})$$

..... ( 31 )

$p_c = 2,7 MPa$
-----------------

Vodivost kapiláry je poté dána vztahem  $\kappa = \frac{p_c}{p_0}$  ..... ( 34 ):

$\kappa = 6,9$
----------------

Ze vztahu  $F = \frac{p_c * A * k_F}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3}$  ..... ( 39 ) se stanoví:

$F_1 = 60,8kN$
----------------

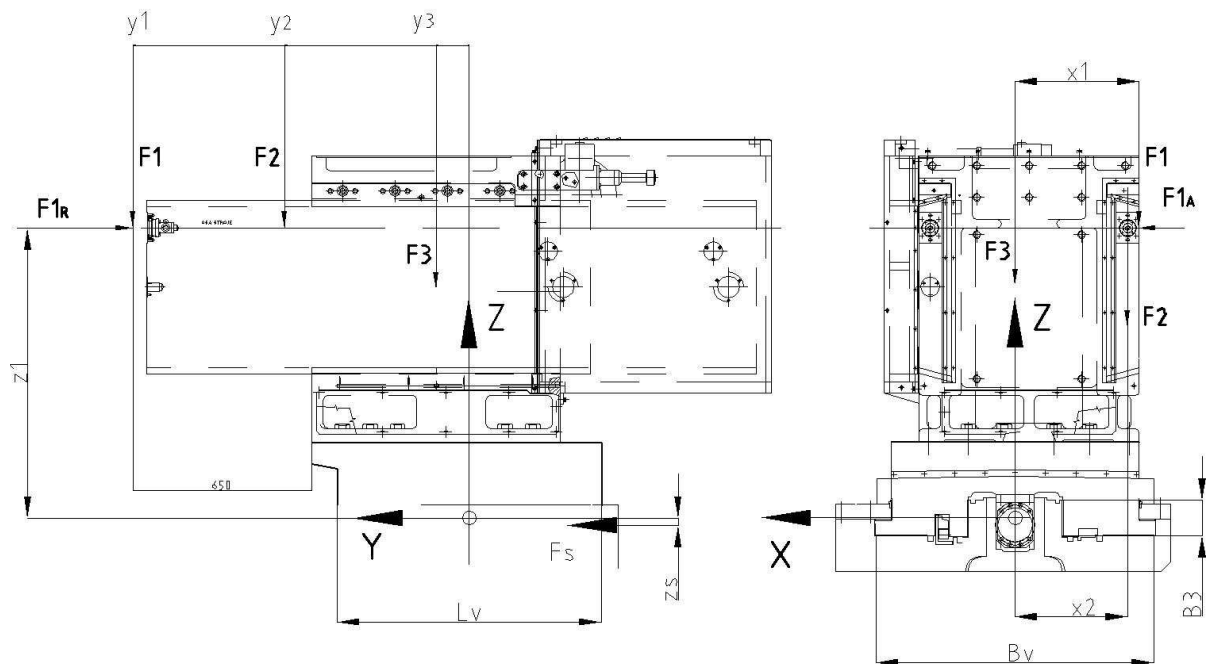
požadavek: $F_M = 60 \text{ kN}$
$F_2 = 8 \text{ kN}$

Ze vztahu  $k(0) = -3 * p_c * A * k_F * \frac{(\kappa - 1)}{\kappa^2} * \frac{1}{h_0} = -3 * \frac{F_0}{h_0} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \dots (41):$

$k(0) = 1712 \text{ kN/mm}$
-----------------------------

## 1.10 Hydrostatická ložiska vzájemně předepnutá

### 1.10.1 Zatížení a transformace sil do soustavy souřadnic vedení



Obr. 16 – Zatížení vedení

Vedení je určeno délkou  $L_v$ , šířkou  $B_v$  dále šířkou bočního vedení  $B_3$ . Do těchto rozměrů se vloží systém souřadnic  $X, Y, Z$ . Vedení je zatíženo vektory řezné síly  $F1$ , tíhových sil  $F2, F3$  a hnací síly  $F_s$ .

Transformace sil působících na těleso do počátku souřadnic spoje ( $X, Y, Z$ ) se provádí

pro  $i = 1, 2 \dots n$  takto:

- určením vektoru polohy sil

$$r_i = x_i \quad y_i \quad z_i \dots \dots \dots (91)$$

$$r_s = x_s \quad 0 \quad z_s \dots \dots \dots (92)$$

- určením vektorů sil

➤ vnější síly

$$F_i = F_{xi} \quad F_{yi} \quad F_{zi} \dots \dots \dots (93)$$

➤ hnací síla

$$F_s = 0 \quad \frac{-\sum F_{yi}}{\eta_v} \quad 0 \dots \dots \dots (94)$$

kde je  $\eta_v = 0,95$  odhad účinnosti vedení.

- určením vektorů momentu v počátku souřadnic spoje (X, Y, Z):

$$M_i = r_i \times F_i \dots\dots\dots (95)$$

$$M_S = r_S \times S \dots\dots\dots (96)$$

Výpočet se provádí takto:

$$M_i = M_{i_x} \quad M_{i_y} \quad M_{i_z} \dots\dots\dots (97)$$

$$M_{i_x} = \text{determinant} \begin{matrix} y_i & z_i \\ F_{yi} & F_{zi} \end{matrix} \dots\dots\dots (98)$$

$$M_{i_y} = \text{determinant} \begin{matrix} z_i & x_i \\ F_{zi} & F_{xi} \end{matrix} \dots\dots\dots (99)$$

$$M_{i_z} = \text{determinant} \begin{matrix} x_i & y_i \\ F_{xi} & F_{yi} \end{matrix} \dots\dots\dots (100)$$

$$M_S = M_{S_x} \quad M_{S_y} \quad M_{S_z} \dots\dots\dots (101)$$

$$M_{S_x} = \text{determinant} \begin{matrix} 0 & z_S \\ F_S & 0 \end{matrix} \dots\dots\dots (102)$$

$$M_{S_y} = \text{determinant} \begin{matrix} z_S & x_S \\ 0 & 0 \end{matrix} \dots\dots\dots (103)$$

$$M_{S_z} = \text{determinant} \begin{matrix} x_S & 0 \\ 0 & F_S \end{matrix} \dots\dots\dots (104)$$

- stanovením celkových vektorů sil a momentů v počátku souřadnic spoje (X, Y, Z):

$$F_c = \sum_1^n F_i \dots\dots\dots (105)$$

$$M_c = \sum_1^n M_i + M_S \dots\dots\dots (106)$$

### 1.10.2 Zatížení párů vedení

Vedení se vyznačuje třemi páry vodicích ploch (A, B, C), každý pár je zatížen momentem a silou, které se odvodí z vektoru síly a momentu působících v počátku soustavy souřadnic. Soustava souřadnic se pokládá do os souměrnosti párů vodicích ploch.

Zatížení párů vodicích ploch se stanoví z těchto vztahů:

$$F_A = \frac{F_z}{2} - \frac{M_y}{B_x} \dots\dots\dots (107)$$

$$F_B = \frac{F_z}{2} + \frac{M_y}{B_x} \dots\dots\dots (108)$$

$$F_C = F_x \dots\dots\dots (109)$$

Kde  $B_x$  je vzdálenost vedení A – B:

$$B_x = B_v - \frac{B_1 + B_2}{2} \dots\dots\dots (110)$$

$$M_A = M_B = \frac{M_x}{2} \dots\dots\dots (111)$$

$$M_C = M_z \dots\dots\dots (112)$$

### 1.10.3 Zatížení dvojice předepnutých ložisek, maximální hodnota

Zatížení dvojice předepnutých ložisek je dáno vztahy:

- Ložiska vedení A a B:

$$F_{A1} = \frac{F_A}{n} + F_{Mx} \dots\dots\dots (113)$$

$$F_{A2} = \frac{F_A}{n} - F_{Mx} \dots\dots\dots (114)$$

$$F_{B1} = \frac{F_B}{n} + F_{Mx} \dots\dots\dots (115)$$

$$F_{B2} = \frac{F_B}{n} - F_{Mx} \dots\dots\dots (116)$$

Kde je  $F_{Mx}$  síla na vedeních A a B vyvolaná momentem  $M_x$  dle vztahu:

$$F_{Mx} = \frac{M_x}{2} \frac{L_{1.1}}{L_{1.1}^2 + L_{2.1}^2} \dots\dots\dots (117)$$

Míry  $L_{1.1}$  a  $L_{1.2}$  jsou vzdálenosti ložisek na vodicích plochách (Obr. 17) a jsou dány vztahy:

$$L_{1.1} = L_v - L_L \dots\dots\dots (118)$$

$$L_{1.2} = L_v - 2L_L \dots\dots\dots (119)$$

$L_L$  ... délka ložiska

- Ložiska vedení C:

$$F_{C1} = \frac{F_C}{n} + F_{Mz} \dots\dots\dots (120)$$

$$F_{C2} = \frac{F_C}{n} - F_{Mz} \dots\dots\dots (121)$$

kde je  $F_{Mz}$  síla na vedení C vyvolaná momentem  $M_z$  dle vztahu:

$$F_{Mz} = M_z \frac{L_{1.1}}{L_{1.1}^2 + L_{2.1}^2} \dots\dots\dots (122)$$

$n$ .....počet ložisek na vodicí dráze

Maximální zatížení dvojic ložisek se následně stanoví pomocí vztahů:

- Max. zatížení dvojice ložisek vedení A – B v záporném smyslu souřadnic ( $\varepsilon_1$ )

$$F_{1M} = \min(F_{A1}, F_{B1}) \dots\dots\dots (123)$$

- Max. zatížení dvojice ložisek vedení A – B v kladném smyslu souřadnic ( $\varepsilon_2$ )

$$F_{2M} = \max(F_{A1}, F_{B1}) \dots\dots\dots (124)$$

- Max. zatížení dvojice ložisek vedení C (mysl nerozhoduje)

$$F_{3M} = \max(|F_{C1}|, |F_{C2}|) \dots\dots\dots (125)$$

### 1.10.4 Rozměry a součinitelé ložisek

- $F_i, F_{oi}$  [N] ..... zatížení  $i$ -tého ložiska
- $h, h_0$  [m] ..... tloušťka olejového filmu
- $k_{Fi}$  [-] ..... součinitel únosnosti ložiska
- $k_{Qi}$  [-] ..... součinitel průtoku ložiska
- $p, p_0$  [MPa] ..... tlak v komoře ložiska

Vedení a hydrostatická ložiska (Obr. 17) jsou určena těmito údaji:

- $L_v$  [m] ..... délka vedení
- $B_i$  [m] ..... šířka vedení a ložiska
- $L_i$  [m] ..... délka ložiska
- $b_i$  [m] ..... šířka komory
- $l_i$  [m] ..... délka komory

pro  $i = 1 \dots 3$

Obvykle platí:

$L_1 = L_i$ , tj. délka ložiska je stejná na všech drahách.

$$L_1 = \frac{L_v}{n_K}$$

Délka ložiska se stanoví ze vztahu ..... ( 59 ), z daných hodnot šířky se určí

$$\delta = \frac{B_1}{L_1} \dots\dots\dots (60)$$

součinitele  $\delta_i$  pro jednotlivá ložiska pomocí vztahu: ..... ( 60 ). Pomocí Tab. 1 - Optimální šířka komory [ 9 ] - se stanoví součinitel šířky komory  $\lambda_i$ , který umožní

$$\lambda = \frac{b_1}{B_1} \dots\dots\dots (61)$$

určit šířku komory  $b_i$  pomocí vztahu ..... ( 61 ). Délka komory je nadále dána

vztahem  $l_1 = L_1 - B_1 + b_1$  ..... ( 62 ).

Součinitelé vodivosti  $k_{Qi}$  a únosnosti ložisek  $k_{Fi}$  pro  $i = 1 \dots 3$  jsou poté dány vztahy:

$$k_Q = 2 \left( \frac{L_1 + l_1}{L_1 - l_1} + \frac{B_1 + b_1}{B_1 - b_1} \right) \dots\dots\dots (12),$$

$$k_F = \frac{L_1 * b_1 + B_1 * l_1 + 2 * B_1 * L_1 + 2 * b_1 * l_1}{6 * L_1 * B_1} \dots\dots\dots (19)$$

Protilehlá ložiska vedení s rozdílnými rozměry ( $B1 - B2$ ) mají rozdílný hydraulický výkon – je to dáno vztahem:

$$p_{2.1} = \frac{P_{02}}{P_{01}} = \frac{p_{02} Q_{02}}{p_{01} Q_{01}} = \left( \frac{p_{02}}{p_{01}} \right)^2 * \frac{k_{Q2}}{k_{Q1}} = \frac{\psi}{\phi^2} \dots\dots\dots (126)$$

Výraz je stanoven pro výkony při  $\varepsilon = 0$  kdy platí:

$$\frac{F_{02}}{F_{01}} = \frac{p_{02} A_2 k_{F2}}{p_{01} A_1 k_{F1}} = 1 \dots\dots\dots (127)$$

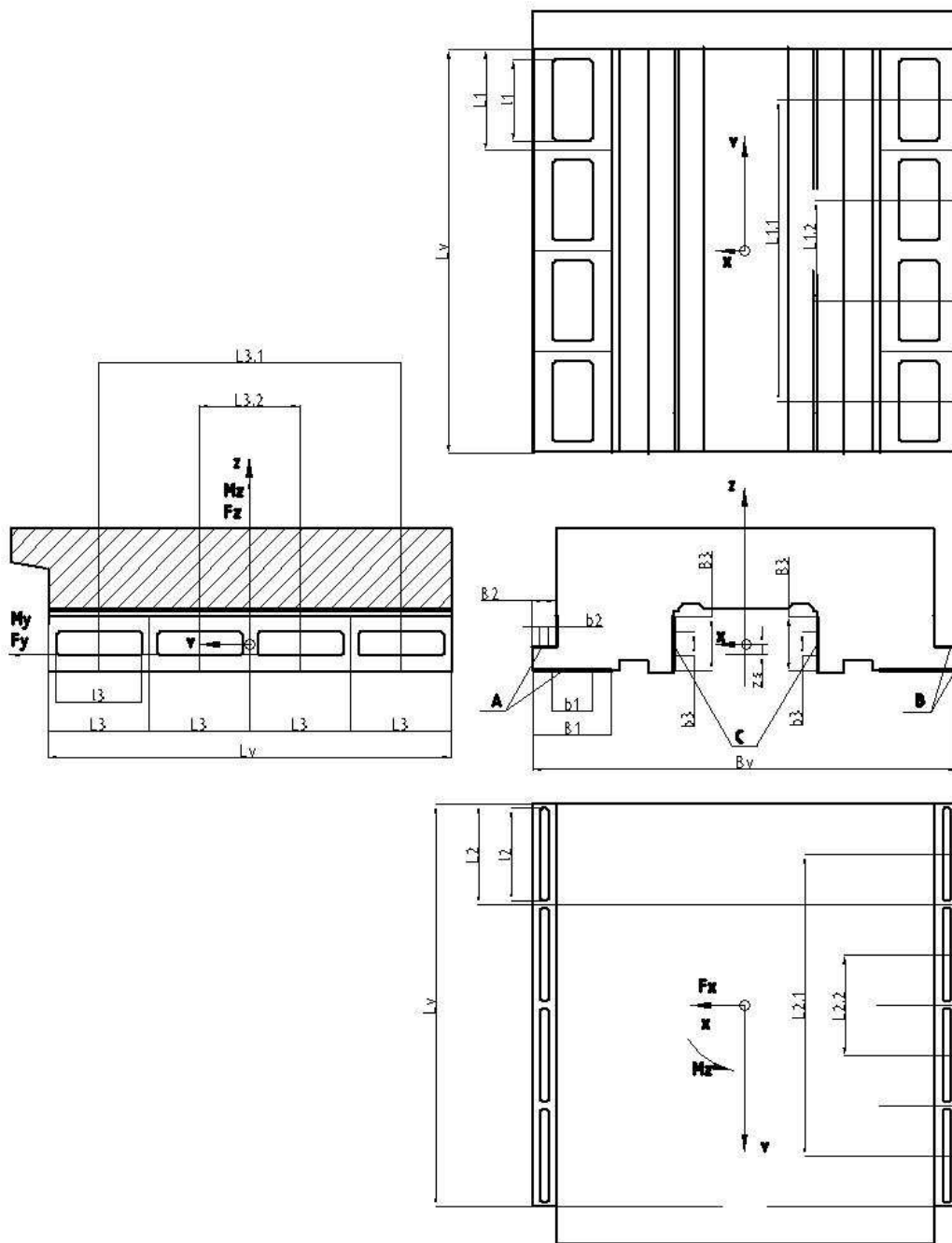
Z tohoto výrazu se určí poměr předepínacích tlaků v ložiskách, který je dán součinitelem  $\phi$ :

$$\phi = \frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{A_2 k_{F2}}{A_1 k_{F1}} \dots\dots\dots (128)$$

Z výrazů  $Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q \dots\dots\dots (24)$  a  $G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots\dots\dots (21)$  se určí průtok pro obě ložiska  $Q_{01}$  a  $Q_{02}$ .

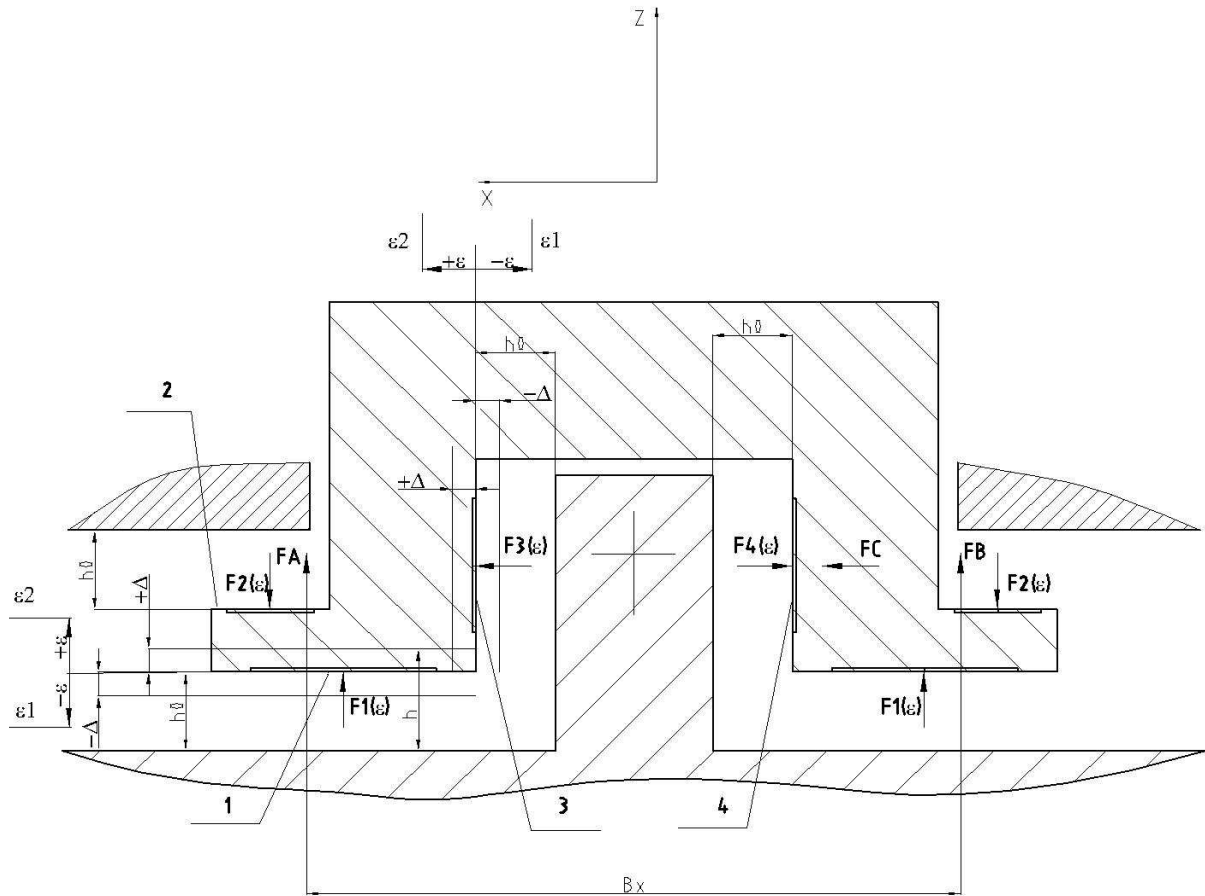
Z uvedených vztahů je zřejmé, že ložisko menší šířky má větší hydraulický výkon i proud – proto se hodnota  $\phi$  omezuje podmínkou:

$$\phi \geq 0,3 \dots\dots\dots (129)$$



Obr. 17 – Hydrostatické vedení se vzájemně předepnutými ložisky – rozměry, zatížení





Obr. 18 – Hydrostatické vedení se vzájemně předepnutými ložisky – rozložení sil působících na vedení

### 1.10.5 Regulace prvkem s konstantní hydraulickou vodivostí (GR = konst.)

#### 1.10.5.1 Součinitel vodivosti kapilár

Součinitel nastavení vodivosti kapiláry je dána vztahem  $\kappa = \frac{p_c}{p_0} \dots (34)$ , pro užší ložisko, kde bude zřejmě vyšší tlak se volí:

$$\kappa_2 = \frac{p_c}{p_{02}} = 1,5$$

..... ( 130 )

Úpravou výrazu  $\phi = \frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{A_2 k_{F2}}{A_1 k_{F1}} \dots (129)$  se stanoví:

$$\phi = \frac{p_{01}}{p_c} \cdot \frac{p_c}{p_{02}} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \dots (131)$$

Pro stanovené  $\kappa_1$  se poté určí  $p_{01}$  ze vztahu  $\kappa = \frac{p_c}{p_0} \dots (34)$

$$p_{0i} = \frac{p_c}{\kappa_i} \dots\dots\dots (132)$$

### 1.10.5.2 Reakce ložisek, tlak čerpadla

#### Ložiska 1, 2

$$F = \frac{p_c * A * k_F}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3}$$

Reakce ložiska 1 v závislosti na relativním posunutí je dáno vztahem  
..... (39) tj.:

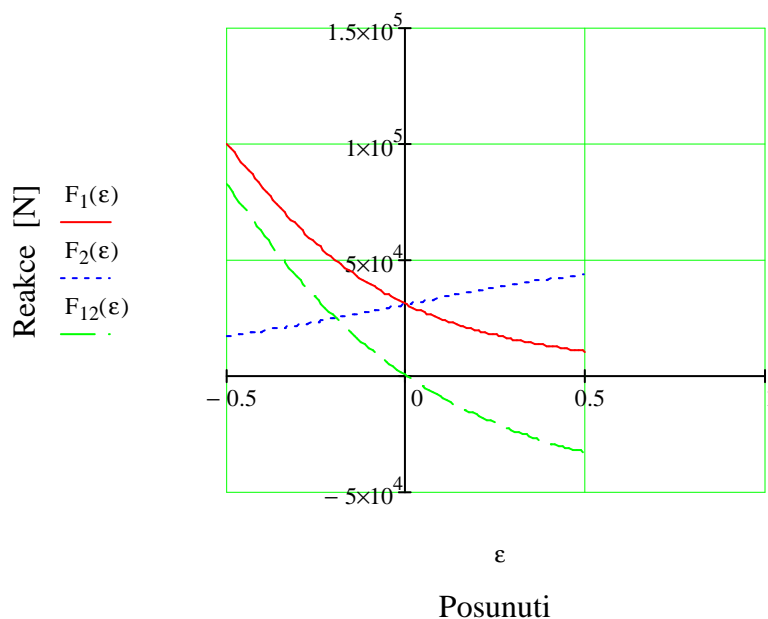
$$F_1 = \frac{p_c * A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (133)$$

Obdobně reakce ložiska 2:

$$F_2 = \frac{p_c * A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (134)$$

Reakce dvojice ložisek 1-2 je následně:

$$F_{12} = F_1 - F_2 = p_c \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon)^3} \right) \dots\dots\dots (135)$$



**Obr. 19 – Reakce ložisek 1-2 v závislosti na posunutí (ε1=-0,5, ε2=+0,5)**

Reakce dvojice ložisek 1-2 pro krajní hodnoty charakteristiky:

- Pro  $\varepsilon = \varepsilon_1$ :

$$F_{12,1} = F_1 - F_2 = p_c \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_1)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_1)^3} \right) \dots\dots\dots (136)$$

- Pro  $\varepsilon = \varepsilon_2$ :

$$F_{12.2} = F_1 - F_2 = p_c \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_2)^3} \right) \dots\dots\dots (137)$$

Přiřazením:

$F_{12.1} = -F_{1M}$  a  $F_{12.2} = -F_{2M}$  se určí vztahy pro stanovení tlaku čerpadla pro ložiska 1, 2:

$$p_{c12.1} = \frac{-F_{1M}}{\frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_1)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_1)^3}} \dots\dots\dots (138)$$

$$p_{c12.2} = \frac{-F_{2M}}{\frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_2)^3}} \dots\dots\dots (139)$$

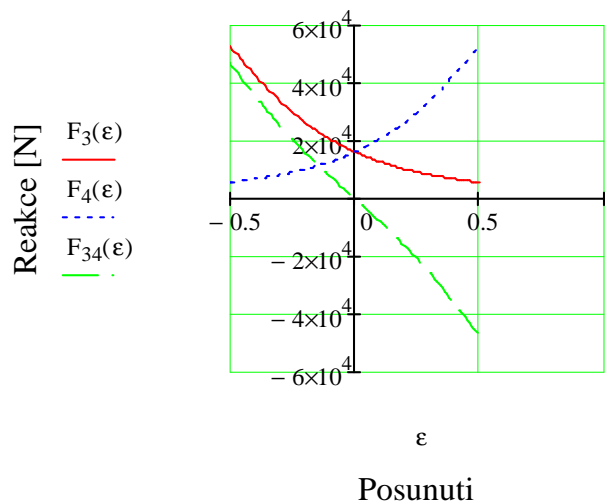
Veličiny  $F_{1M}$ ,  $F_{2M}$  se stanoví ze vztahů  $F_{1M} = \min(F_{A1}, F_{B1}) \dots\dots\dots (124)$ ,

$F_{2M} = \max(F_{A1}, F_{B1}) \dots\dots\dots (125)$ .

### Ložiska 3, 4

Reakce dvojice ložisek 3-4 je poté:

$$F_{34} = F_3 - F_4 = p_c \left( \frac{A_3 * k_{F3}}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 + \varepsilon)^3} - \frac{A_3 * k_{F3}}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 - \varepsilon)^3} \right) \dots\dots\dots (140)$$



**Obr. 20 - Reakce ložisek 3-4 v závislosti na posunutí ( $\varepsilon_1=-0,5$ ,  $\varepsilon_2=+0,5$ )**

Reakce dvojice ložisek 3-4 pro krajní hodnoty charakteristiky:

- Pro  $\varepsilon = \varepsilon_2$ :

$$F_{34} = F_3 - F_4 = p_c \left( \frac{A_3 * k_{F3}}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{A_3 * k_{F3}}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 - \varepsilon_2)^3} \right) \dots\dots\dots (141)$$

Přiřazením  $F_{34} = -F_{3M}$  a  $\kappa_3 = \kappa_1$  se určí vztahy pro stanovení tlaku čerpadla pro ložiska 3, 4:

$$p_{c34} = \frac{-F_{3M}}{\frac{A_3 * k_{F3}}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{A_3 * k_{F3}}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 - \varepsilon_2)^3}} \dots\dots\dots (142)$$

Veličiny  $F_{3M}$  se stanoví ze vztahu  $F_{3M} = \max(|F_{C1}|, |F_{C2}|)$  ..... (126)

### Tlak čerpadla

Tlak čerpadla je poté dán vztahem:

$$p_c = \max(p_{c12.1}, p_{c12.2}, p_{c34}) \dots\dots\dots (143)$$

### 1.10.5.3 Předpětí a tuhost ložisek

Počáteční tlak (předpětí) v jednotlivých ložiskách  $i = 1 \dots 3$  je dán vztahem:

$$p_{0i} = \frac{p_c}{\kappa_i} \dots\dots\dots (133)$$

Tuhost jednotlivých ložisek při  $\varepsilon = 0$  vyplývá ze vztahu:

$$k(0) = -3 * p_c * A * k_F * \frac{(\kappa - 1)}{\kappa^2} * \frac{1}{h_0} = -3 * \frac{F_0}{h_0} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \dots\dots\dots (41) \text{ tj.}$$

$$k(0)_i = 3 \frac{F_0}{h_0} \left(1 - \frac{1}{\kappa_i}\right) \dots\dots\dots (144)$$

kde je  $F_0$  předpětí protilehlých ložisek dle vztahu:

$$F_0 = p_{0i} * A_i * k_{F,i} \dots\dots\dots (145)$$

Celková tuhost dvojice předepjatých ložisek je poté dána vztahem:

$$k(0)_{12} = k(0)_1 + k(0)_2 = 3 \frac{F_0}{h_0} \left(2 - \frac{1}{\kappa_1} - \frac{1}{\kappa_2}\right) \dots\dots\dots (146)$$

### 1.10.5.4 Tlak v ložisku, proud, hydraulický výkon ložiska

Tlak v ložisku v závislosti na posunutí je dán vztahem  $p = \frac{p_c}{1 + (\kappa - 1)(1 + \varepsilon)^3}$  ..... (35) tj. pro protilehlá ložiska z dvojice:

$$p_1 = \frac{p_c}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (147)$$

$$p_2 = \frac{p_c}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (148)$$

$$p_3 = \frac{p_c}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (149)$$

$$p_4 = \frac{p_c}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 - \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (150)$$

$$Q = \frac{p * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_Q \dots (42) \text{ tj. pro}$$

Proud protékající ložiskem je dán vztahem protilehlá ložiska z dvojice:

$$Q_1 = \frac{p_1 * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q1} \dots\dots\dots (151)$$

$$Q_2 = \frac{p_2 * h_0^3 * (1 - \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q2} \dots\dots\dots (152)$$

$$Q_3 = \frac{p_3 * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q3} \dots\dots\dots (153)$$

$$Q_4 = \frac{p_4 * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q3} \dots\dots\dots (154)$$

Proud dvojice ložisek je dán součtem:

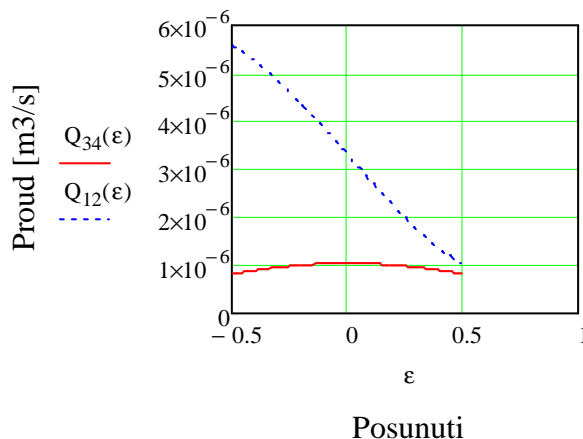
$$Q_{12} = Q_1 + Q_2 \dots\dots\dots (155)$$

$$Q_{34} = Q_3 + Q_4 \dots\dots\dots (156)$$

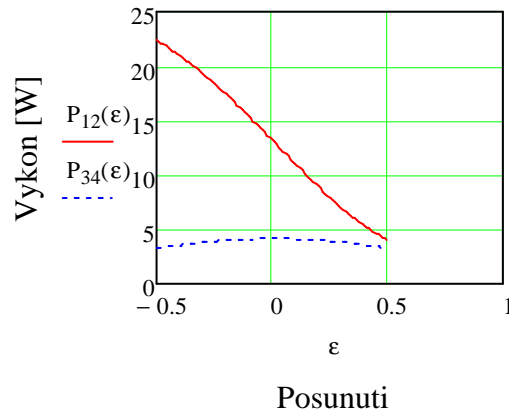
Hydraulický výkon dvojice ložisek je poté:

$$P_{12} = Q_{12} * p_c \dots\dots\dots (157)$$

$$P_{34} = Q_{34} * p_c \dots\dots\dots (158)$$



**Obr. 21 – Proud dvojic ložisek 1-2 a 3-4**



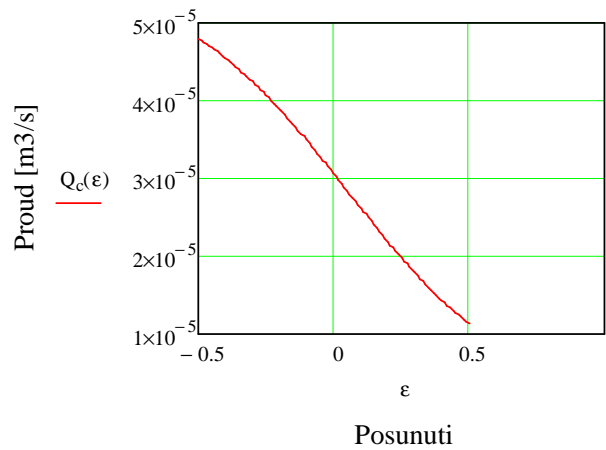
Obr. 22 – Hydraulický výkon ložisek 1-2 a 3-4

### 1.10.5.5 Proud a hydraulický výkon vedení

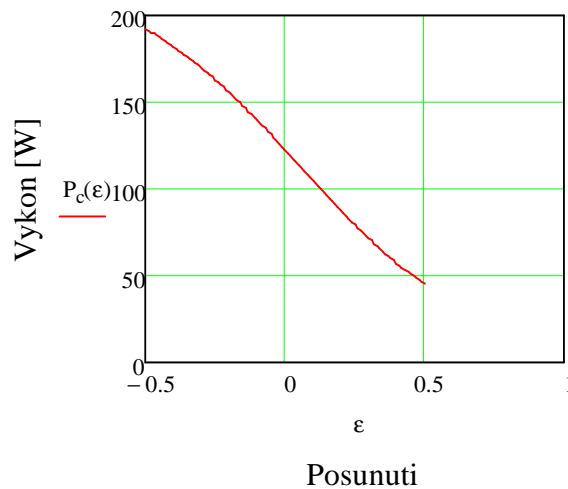
Celkový proud protékající vedením a hydraulický výkon jsou dány vztahy:

$$Q_c = (2Q_{12} + Q_{34})n \dots\dots\dots (159)$$

$$P_{Hc} = Q_c * p_c \dots\dots\dots (160)$$



Obr. 23 – Proud hydrostatického vedení



Obr. 24 – Hydraulický výkon vedení

**Př.: 6 - Hydrostatické přímočaré vedení s regulací kapilárami ( $G_R = \text{konst.}$ ) - zatížení v režimu 1. hrubování**

Dáno:

Délka vedení	$L_v = 960 \text{ mm}$
Celková šířka vedení A – B (Obr. 17)	$B_v = 1 \ 100 \text{ mm}$
Počet ložisek na 1 dráze	$n = 4$
Délka ložiska	$L_L = 240 \text{ mm}$
Šířky vedení (ložisek)	$B_i = 0,185 \ 0,056 \ 0,128 \text{ m}$
Součinitel únosnosti ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$k_{Fi} = 0,615 \ 0,64 \ 0,63$
Součinitel vodivosti ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$k_{Qi} = 14 \ 29,3 \ 16,8$
Plocha ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$A_i = 0,044 \ 0,013 \ 0,031 \text{ m}^2$
Součinitel vodivosti kapiláry ložiska rozměru 2 (Obr. 18)	$\kappa_2 = 1,5$
Zatížení saní – režim 1. hrubování (informativně – výchozí hodnoty pro stanovení max. zatížení saní):	
• Řezná síla:	
➤ Svislá složka řezné síly	$F = 200 \text{ kN}$
➤ Příčná složka řezné síly	$F_R = 160 \text{ kN}$
➤ Podélná složka řezné síly	$F_A = 160 \text{ kN}$
• Vektor polohy řezné síly	$rI = -450 \ 740 \ 1055 \text{ mm}$
• Tíha lamely 1 a 2	$F_2 = F_4 = 16 \text{ kN}$
• Vektor polohy tíhy lamely 1	$r2 = -408 \ 19 \ 0 \text{ mm}$
• Vektor polohy tíhy lamely 2	$r4 = 408 \ 70 \ 0 \text{ mm}$
• Tíha horního suportu a příčných saní	$F3 = 40 \text{ kN}$
• Vektor polohy tíhy suportu a příčných saní	$r3 = 0 \ 120 \ 0 \text{ mm}$
Zatížení saní v počátku souřadnic saní stanovené z režimu 1. hrubování:	
• Vektor síly	$F_c = F_x \ F_y \ F_z =$ $[120 \ 0 \ -272] \text{ kN}$
• Vektor momentu	$M_c = M_x \ M_y \ M_z =$ $[16 \ 23,56 \ -16,8] \text{ kNm}$
Kinematická viskozita oleje (ISO HV68/40°C)	$\nu = 6,8 * 10^{-5} \text{ m}^2 * \text{s}^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,9 * 10^3 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_0$	$h_0 = 0,03 \text{ mm}$
Rozsah relativního posunutí saní ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )	$\varepsilon \in \langle \varepsilon_1, \varepsilon_2 \rangle, \varepsilon_1 = -0,5, \varepsilon_2 = 0,5$
Program pro návrh hydrostatického vedení	[10]

Stanovit:

- Součinitel vodivosti kapilár ložisek  $\kappa_i$  a  $\kappa_3$
- Tlak  $p_c$  čerpadla
- Proud  $Q_c$  a výkon  $P_c$  čerpadla
- Tlakové předpětí  $p_{01}, p_{02}, p_{03}$
- Počáteční tuhost předepnuté dvojice ložisek  $k_{I2}(0)$
- Rozměry kapilár

Součinitel vodivosti kapiláry  $\kappa_l$  se určí ze vztahů 
$$\phi = \frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{A_2 k_{F2}}{A_1 k_{F1}} \dots (129),$$

$$\phi = \frac{p_{01}}{p_c} \frac{p_c}{p_{02}} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \dots (132) \text{ a dané hodnoty } \kappa_2 = 1,5, \text{ dále se volí}$$

$$\kappa_3 = \kappa_l:$$

$\phi = 0,315$
$\kappa_l = 4,76$
$\kappa_3 = 4,76$

Zatížení vedení A, B, C (Obr. 17) je dáno vztahy 
$$F_A = \frac{F_z}{2} - \frac{M_y}{B_x} \dots (108),$$

$$F_B = \frac{F_z}{2} + \frac{M_y}{B_x} \dots (109),$$

$$F_C = F_x \dots (110)$$

$$B_x = B_v - \frac{B_1 + B_2}{2} \dots (111),$$

$$M_A = M_B = \frac{M_x}{2} \dots (112), \quad M_C = M_z \dots (112), \quad M_C = M_z \dots (113).$$

$F_A = -160 \text{ kN}$
$F_B = -112 \text{ kN}$
$F_C = 120 \text{ kN}$

Síla na vedeních A a B od momentu  $M_x$  je dána vztahem 
$$F_{Mx} = \frac{M_x}{2} \frac{L_{1.1}}{L_{1.1}^2 + L_{2.1}^2} \dots (118)$$

$$L_{1.1} = L_v - L_L \dots (119), \quad L_{1.2} = L_v - 2L_L \dots (120), \text{ síla na vedeních C od momentu } M_z$$

je dána vztahem 
$$F_{Mz} = M_z \frac{L_{1.1}}{L_{1.1}^2 + L_{2.1}^2} \dots (122)$$

Zatížení dvojic ložisek vedení A a B jsou dána vztahy 
$$F_{A1} = \frac{F_A}{n} + F_{Mx} \dots (113),$$

$$F_{A2} = \frac{F_A}{n} - F_{Mx} \dots (114), \quad F_{B1} = \frac{F_B}{n} + F_{Mx} \dots (115), \quad F_{B2} = \frac{F_B}{n} - F_{Mx} \dots (116)$$

Zatížení dvojic ložisek vedení C jsou poté dána vztahy 
$$F_{C1} = \frac{F_C}{n} + F_{Mz} \dots (120),$$

$$F_{C2} = \frac{F_C}{n} - F_{Mz} \dots (121)$$

$F_{A1} = -35,6 \text{ kN}$
$F_{A2} = -51 \text{ kN}$
$F_{B1} = -17 \text{ kN}$
$F_{B2} = -32,4 \text{ kN}$
$F_{C1} = 13,8 \text{ kN}$
$F_{C2} = 46,2 \text{ kN}$



Max. zatížení dvojice ložisek vedení A – B v záporném smyslu souřadnic ( $\varepsilon_1$ ) je poté dáno vztahem  $F_{1M} = \min(F_{A1}, F_{B1}) \dots\dots\dots (123)$ , max. zatížení dvojice ložisek vedení A – B v kladném smyslu souřadnic ( $\varepsilon_2$ ) vztahem  $F_{2M} = \max(F_{A1}, F_{B1}) \dots (124)$ , max. zatížení dvojice ložisek vedení C vztahem  $F_{3M} = \max(|F_{C1}|, |F_{C2}|) \dots\dots\dots (125)$ :

$F_{1M} = -51 \text{ kN}$
$F_{2M} = -17 \text{ kN}$
$F_{3M} = 46,2 \text{ kN}$

Využitím vztahů 
$$p_{c12.1} = \frac{-F_{1M}}{\frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_1)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_1)^3}} \dots (139)$$

$$p_{c12.2} = \frac{-F_{2M}}{\frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_2)^3}} \dots\dots(140)$$

$$p_{c34} = \frac{-F_{3M}}{\frac{A_3 * k_{F3}}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{A_3 * k_{F3}}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 - \varepsilon_2)^3}} \dots\dots\dots (142) \text{ se stanoví:}$$

$p_{c12.1} = 3,3 \text{ MPa}$
$p_{c12.2} = -2,7 \text{ MPa}$
$p_{c34} = 3,9 \text{ MPa}$

Tlak čerpadla je poté dán vztahem  $p_c = \max(p_{c12.1}, p_{c12.2}, p_{c34}) \dots (143)$ :

$p_c = 3,9 \text{ MPa}$
-------------------------

Proud protékající ložisky je dán vztahy:

$$p_1 = \frac{p_c}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots (147), \quad p_2 = \frac{p_c}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (148)$$

$$p_3 = \frac{p_c}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (149), \quad p_4 = \frac{p_c}{1 + (\kappa_3 - 1)(1 - \varepsilon)^3} \dots\dots\dots (150), \quad \eta = \rho * v \dots (3)$$

$$Q_1 = \frac{p_1 * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q1} \dots (151), \quad Q_2 = \frac{p_2 * h_0^3 * (1 - \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q2} \dots\dots\dots (152)$$

$$Q_3 = \frac{p_3 * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q3} \dots (153), \quad Q_4 = \frac{p_4 * h_0^3 * (1 - \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q3} \dots\dots\dots (154)$$

$$Q_{12} = Q_1 + Q_2 \dots\dots\dots (155)$$

$$Q_{34} = Q_3 + Q_4 \dots\dots\dots (156)$$

$$Q_c = (2Q_{12} + Q_{34})n \dots\dots\dots (159)$$

Výpočet se provede pro relativní posunutí  $\varepsilon = \varepsilon_1 = -0,5$ , při kterém je proud maximální (viz Obr. 21 – Proud dvojic ložisek 1-2 a 3-4). Výsledkem je:

$Q_c = 2,8 \text{ l/min}$
---------------------------

Výkon čerpadla je dán vztahem  $P_{Hc} = Q_c * p_c \dots\dots\dots (160)$ :

$P_c = 0,18 \text{ kW}$
-------------------------

Předpětí dvojice ložisek se stanoví vztahem  $p_{oi} = \frac{p_c}{\kappa_i} \dots\dots\dots (132)$  pro  $i = 1 \dots 3$ :

$p_{o1} = 0,82 \text{ MPa}$
-----------------------------

$p_{02} = 2,6 \text{ MPa}$
$p_{03} = 0,82 \text{ MPa}$

Tuhost dvojice ložisek je dána vztahy  $F_0 = p_{0i} * A_i * k_{F,i} \dots \dots \dots (145)$ ,

$$k(0)_{12} = k(0)_1 + k(0)_2 = 3 \frac{F_0}{h_0} \left( 2 - \frac{1}{\kappa_1} - \frac{1}{\kappa_2} \right) \dots \dots \dots (146):$$

$F_{012} = 22,4 \text{ kN}$
$k_{012} = 2513 \text{ kN/mm}$
$F_{034} = 15,9 \text{ kN}$
$k_{034} = 2508 \text{ kN/mm}$

Rozměry kapilár se určí ze stanovených  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  použitím vztahů:  $G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots \dots (21)$

$$G_R = \frac{G_0}{\kappa - 1} * k_Q \dots \dots \dots (36), \quad l_R = \frac{\pi * d_R^4}{128 * \eta * G_R} \dots \dots (38), \text{ při volbě průměrů kapilár } d_{R1}, d_{R2},$$

$d_{R3}$ :

$d_{R1} = 0,5 \text{ mm}$
$l_{R1} = 183 \text{ mm}$
$d_{R2} = 0,8 \text{ mm}$
$l_{R2} = 76 \text{ mm}$
$d_{R3} = 0,8 \text{ mm}$
$l_{R3} = 152 \text{ mm}$

**Př.: 7 - Hydrostatické přímočaré vedení s regulací kapilárami ( $G_R = \text{konst.}$ ) – zatížení v režimu dokončování**

Dáno:

Specifikace vedení dle Př.: 6 - Hydrostatické přímočaré vedení s regulací kapilárami ( $G_R = \text{konst.}$ ) - zatížení v režimu 1. hrubování	
Tlak čerpadla	$p_c = 3,9 \text{ MPa}$
Součinitel únosnosti ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$k_{Fi} = 0,615 \quad 0,64 \quad 0,63$
Plocha ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$A_i = 0,044 \quad 0,013 \quad 0,031 \text{ m}^2$
Plocha komor ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$A_{ki} = 0,013 \quad 0,004 \quad 0,01 \text{ m}^2$
Počet ložisek na 1 dráze	$n_K = 4$
Součinitel vodivosti kapiláry ložiska rozměru 2 (Obr. 18)	$\kappa_2 = 1,5$
Součinitel vodivosti kapiláry ložiska rozměru 1 (Obr. 18)	$\kappa_1 = 4,76$
Zatížení saní – režim dokončování:	
• Řezná síla:	$F = 0 \text{ kN}$
• Tíha lamely 1 a 2	$F_2 = F_4 = 16 \text{ kN}$
• Vektor polohy tíhy lamely 1	$r_2 = -408 \quad 19 \quad 0 \text{ mm}$
• Vektor polohy tíhy lamely 2	$r_4 = 408 \quad 70 \quad 0 \text{ mm}$
• Tíha horního suportu a příčných saní	$F_3 = 40 \text{ kN}$
• Vektor polohy tíhy suportu a příčných saní	$r_3 = 0 \quad 120 \quad 0 \text{ mm}$
Max. rychlost ložiska vzhledem k vedení při relativním posunutí $\epsilon_{10}$	$v_l = 10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

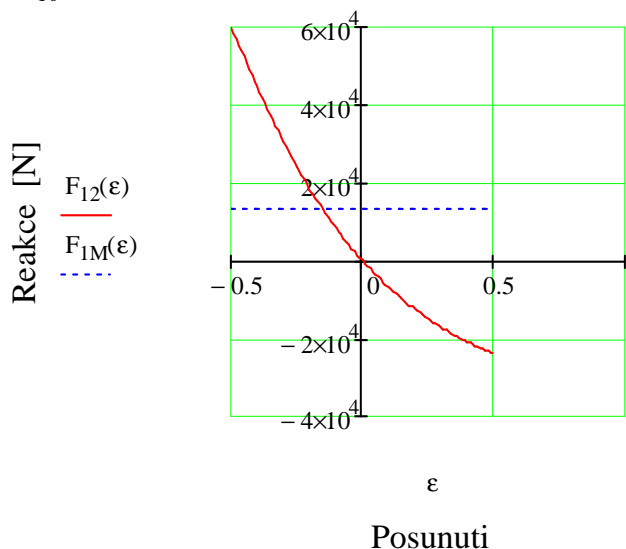
Zatížení ložisek stanovené z režimu dokončování:	
Max. zatížení dvojice ložisek vedení A – B v záporném smyslu souřadnic ( $\varepsilon_1$ )	$F_{1M} = -13,3$ kN
Max. zatížení dvojice ložisek vedení A – B v kladném smyslu souřadnic ( $\varepsilon_2$ )	$F_{2M} = -4,7$ kN
Max. zatížení dvojice ložisek vedení C	$F_{3M} = 0$ kN
Rozsah relativního posunutí saní ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )	$\varepsilon \in \langle \varepsilon_1, \varepsilon_2 \rangle, \varepsilon_1 = -0,5, \varepsilon_2 = 0,5$
Kinematická viskozita oleje (ISO HV68/40°C)	$\nu = 6,8 * 10^{-5} m^2 * s^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,9 * 10^3 kg * m^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_0$	$h_0 = 0,03$ mm
Program pro kontrolu navrženého hydrostatického vedení při různých zatíženích	[12]
Program pro stanovení zatížení dvojice hydrostatických ložisek ze zatížení vedení	[14]

Stanovit:

- Max. posunutí saní v ložisku  $\varepsilon_{10}$
- Třecí síla  $F_{Tc}$  a výkon vedení  $P_{Tc}$

Užitím vztahu  $F_{12,1} = F_1 - F_2 = p_c \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_1)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_1)^3} \right) \dots (137)$  se

stanoví závislost reakce dvojice ložisek na posunutí  $\varepsilon$ . Pro zatížení  $F_{1M} = -13,3$  kN se z grafu určí příslušné posunutí  $\varepsilon_{10}$ .



**Obr. 25 – Zatížení dvojice ložisek 1-2 při režimu dokončování**

Výraz je možné řešit také numericky pomocí procedury programu [ 3]:

$$C(\varepsilon_{10}) = p_c \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_{10})^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_{10})^3} \right) + F_{1M} \dots (161)$$

$$\varepsilon_{10} = \text{root}[C(\varepsilon_{10}), \varepsilon_{10}, -0,5, 0,5] \dots (162)$$

$F_{1M} = -13,3$  kN

$\varepsilon_{10} = -0,15$
----------------------------

Třecí síla a třecí výkon pro 1 ložisko se stanoví pomocí vztahů:  $\eta = \rho * v \dots \dots (3)$ ,

$$F_T = \frac{A - A_k}{h_0(1 + \varepsilon)} \eta * v_1 \dots \dots (44), P_T = F_T * v_1 \dots \dots (46)$$

Při volbě  $\varepsilon_i = 0$  se stanoví pro ložiska  $i = 1 \dots 3$ :

$F_{Ti} = 10,6 \quad 3,1 \quad 7,1 \text{ N}$
$P_{Ti} = 1,7 \quad 0,5 \quad 1,2 \text{ W}$

Celková třecí síla a výkon se určí pomocí vztahů

$$F_{Tc} = 2n_K \sum_{i=1}^3 F_{Ti} \dots \dots \dots (163)$$

$$P_{Tc} = 2n_K \sum_{i=1}^3 P_{Ti} \dots \dots \dots (164)$$

$F_{Tc} = 167 \text{ N}$
$P_{Tc} = 28 \text{ W}$

## 1.10.6 Regulace prvkem s konstantním proudem (Q=konst.)

### 1.10.6.1 Reakce a tlakové předpětí ložisek, tlak čerpadla

#### Ložiska 1, 2

Reakce ložiska 1 v závislosti na relativním posunutí je dáno vztahem  $F = \frac{p_0 * A * k_F}{(1 + \varepsilon)^3} \dots (52)$

tj.:

$$F_1 = \frac{p_{01} * A_1 * k_{F1}}{(1 + \varepsilon)^3} \dots \dots \dots (165)$$

Obdobně reakce ložiska 2:

$$F_2 = \frac{p_{02} * A_2 * k_{F2}}{(1 - \varepsilon)^3} \dots \dots \dots (166)$$

Vzhledem k tomu, že  $F_0 = p_{0i} * A_i * k_{Fi} \dots \dots (145)$  je poté:

Reakce dvojice ložisek 1-2 a 3-4:

$$F_{12} = F_1 - F_2 = p_{01} * A_1 * k_{F1} \left[ \frac{1}{(1 + \varepsilon)^3} - \frac{1}{(1 - \varepsilon)^3} \right] \dots \dots \dots (167)$$

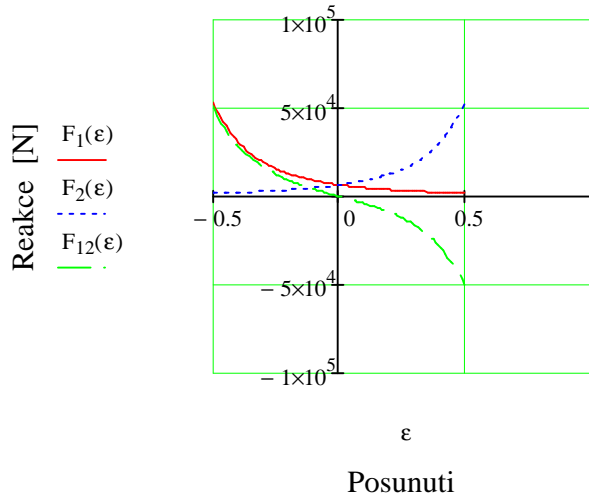
$$F_{34} = F_3 - F_4 = p_{03} * A_3 * k_{F3} \left[ \frac{1}{(1 + \varepsilon)^3} - \frac{1}{(1 - \varepsilon)^3} \right] \dots \dots \dots (168)$$

Pro  $\varepsilon = \varepsilon_1$  je reakce dvojice ložisek 1-2:

$$F_{12.1} = F_1 - F_2 = p_{01} * A_1 * k_{F1} \left[ \frac{1}{(1 + \varepsilon_1)^3} - \frac{1}{(1 - \varepsilon_1)^3} \right] \dots \dots \dots (169)$$

Pro  $\varepsilon = \varepsilon_2$  je reakce dvojice ložisek 1-2:

$$F_{12.2} = F_1 - F_2 = p_{01} * A_1 * k_{F1} \left[ \frac{1}{(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{1}{(1 - \varepsilon_2)^3} \right] \dots \dots \dots (170)$$



**Obr. 26 - Reakce ložisek 1-2 v závislosti na posunutí ( $\varepsilon_1 = -0,5$ ,  $\varepsilon_2 = +0,5$ ) pro  $Q = \text{konst.}$**

Přiřazením:

$F_{12.1} = -F_{1M}$  a  $F_{12.2} = -F_{2M}$  se určí vztahy pro stanovení tlakového předpětí pro ložisko 1:

$$p_{01.1} = \frac{-F_{1M}}{A_1 * k_{F1} \left[ \frac{1}{(1 + \varepsilon_1)^3} - \frac{1}{(1 - \varepsilon_1)^3} \right]} \dots \dots \dots (171)$$

$$p_{01.2} = \frac{-F_{2M}}{A_1 * k_{F1} \left[ \frac{1}{(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{1}{(1 - \varepsilon_2)^3} \right]} \dots \dots \dots (172)$$

Tlakové předpětí ložisek je následně dáno vztahy:

$$p_{01} = \max(p_{01.1}, p_{01.2}) \dots \dots \dots (173)$$

$$p_{02} = \frac{p_{01}}{\phi} \dots \dots \dots (174)$$

Kde je  $\phi = \frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{A_2 k_{F2}}{A_1 k_{F1}} \dots \dots \dots (128)$

Pásmo posunutí  $\varepsilon \in \langle \varepsilon_{1.1} | \varepsilon_{2.1} \rangle$  ve vztahu k vnějšímu zatížení  $F_{1M}$ ,  $F_{2M}$ , ve kterém je režim hydrostatiky platný, se stanoví pomocí procedury programu [ 3]:

$$C_1(\varepsilon_{1.1}) = p_{01} \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{(1 + \varepsilon_{1.1})^3} - \frac{A_1 * k_{F1}}{(1 - \varepsilon_{1.1})^3} \right) + F_{1M} \dots \dots \dots (175)$$

$$\varepsilon_{1.1} = \text{root}[C_1(\varepsilon_{1.1}), \varepsilon_{1.1}, -0,5,0,5] \dots \dots \dots (176)$$

$$C_2(\varepsilon_{2.1}) = p_{01} \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{(1 + \varepsilon_{2.1})^3} - \frac{A_1 * k_{F1}}{(1 - \varepsilon_{2.1})^3} \right) + F_{2M} \dots \dots \dots (177)$$

$$\varepsilon_{2.1} = \text{root}[C_2(\varepsilon_{2.1}), \varepsilon_{2.1}, -0,5,0,5] \dots \dots \dots (178)$$

Hodnoty jsou také omezeny těmito podmínkami:

$$\varepsilon_{1.1} = 0, \text{ když } p_{01.1} \leq 0, \varepsilon_{2.1} = 0, \text{ když } p_{01.2} \leq 0. \dots \dots \dots (179)$$

Max. tlaky v ložiskách 1, 2 jsou dány dosazením  $\varepsilon_{1.1}$ ,  $\varepsilon_{2.1}$  do vztahu:  $p = \frac{p_0}{\left(\frac{h}{h_0}\right)^3} = \frac{p_0}{(1 + \varepsilon)^3}$

..... (51):

$$p_1(\varepsilon_{1.1}) = \frac{p_{01}}{(1 + \varepsilon_{1.1})^3} \dots \dots \dots (180)$$

$$p_2(\varepsilon_{2.1}) = \frac{p_{01}}{(1 - \varepsilon_{2.1})^3} \dots \dots \dots (181)$$

### Ložiska 3, 4

Pro  $\varepsilon = \varepsilon_2$  je reakce dvojice ložisek 3-4:

$$F_{34} = F_3 - F_4 = p_{03} * A_3 * k_{F3} \left[ \frac{1}{(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{1}{(1 - \varepsilon_2)^3} \right]$$

Přirazením  $F_{34} = -F_{3M}$  se určí vztahy pro stanovení tlakového předpětí pro ložisko 3

$$p_{03} = \frac{-F_{3M}}{A_3 * k_{F3} \left[ \frac{1}{(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{1}{(1 - \varepsilon_2)^3} \right]} \dots \dots \dots (182)$$

Max.tlaky v ložiskách 3, 4 jsou dány vztahy:

$$p_3(\varepsilon_2) = \frac{p_{03}}{(1 - \varepsilon_2)^3} \dots \dots \dots (183)$$

### Vedení

Maximální tlak v komorách ložisek vedení je dán vztahem:

$$p_M = \max(p_1(\varepsilon_{1.1}), p_2(\varepsilon_{2.1}), p_3(\varepsilon_2)) \dots \dots \dots (184)$$

Tlak čerpadla je poté dán vztahem:

$$p_c = p(\varepsilon_1) + 1MPa \dots \dots \dots (56)$$

### 1.10.6.2 Předpětí a tuhost ložisek

Tlakové předpětí ložisek je dáno vztahy  $p_{01} = \max(p_{01.1}, p_{01.2}) \dots (173)$ ,  $p_{02} = \frac{p_{01}}{\phi}$

$\dots (174)$ ,  $p_3(\varepsilon_2) = \frac{P_{03}}{(1 - \varepsilon_2)^3} \dots (183)$ . Silové předpětí se stanoví dle vztahu

$$F_0 = p_{0i} * A_i * k_{F,i} \dots (145) \text{ pro } i = 1 \text{ a } 3.$$

Tuhost jednotlivých ložisek při  $\varepsilon = 0$  vyplývá ze vztahu:

$$k(0)_Q = -3 * p_0 * A * k_F * \frac{1}{h_0} = -3 * \frac{F_0}{h_0} \dots (54)$$

Celková tuhost dvojice předepjatých ložisek je následně dána vztahem:

$$k(0)_{12} = k(0)_1 + k(0)_2 = 6 \frac{F_0}{h_0} \dots (185)$$

### 1.10.6.3 Tlak v ložisku, proud, hydraulický výkon ložiska

Tlak v ložisku v závislosti na posunutí je dán vztahem  $p = \frac{p_0}{\left(\frac{h}{h_0}\right)^3} = \frac{p_0}{(1 + \varepsilon)^3} \dots (51)$  tj. pro

protilehlá ložiska z dvojice:

$$p_1 = \frac{p_{01}}{(1 + \varepsilon)^3} \dots (186)$$

$$p_2 = \frac{p_{02}}{(1 - \varepsilon)^3} \dots (187)$$

$$p_3 = \frac{p_{03}}{(1 + \varepsilon)^3} \dots (188)$$

$$p_4 = \frac{p_{03}}{(1 - \varepsilon)^3} \dots (189)$$

Proud protékající ložiskem je dán vztahem:

$$Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q \dots (24), G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots (21) \text{ tj. pro jednotlivá ložiska:}$$

$$Q_1 = p_{01} * G_0 * k_{Q1} \dots (190)$$

$$Q_2 = p_{02} * G_0 * k_{Q2} \dots (191)$$

$$Q_4 = Q_3 = p_{03} * G_0 * k_{Q3} \dots (192)$$

Proud dvojice ložisek je dán součtem:

$$Q_{12} = Q_1 + Q_2 \dots (155), (Q_{34} = Q_3 + Q_4 \dots (156)$$

Hydraulický výkon dvojice ložisek je následně dán vztahy:

$$P_{12} = Q_{12} * p_c \dots (157), P_{34} = Q_{34} * p_c \dots (158).$$

Proud a hydraulický výkon vedení se stanoví stejně jako u ložisek regulací  $G_R = \text{konst}$

**Př.: 8 - Hydrostatické přímočaré vedení s regulací prvkem s konstantním proudem ( $Q = \text{konst.}$ ) - zatížení v režimu 1. hrubování**

Dáno:

Délka vedení	$L_v = 960 \text{ mm}$
Celková šířka vedení A – B (Obr. 17)	$B_v = 1\ 100 \text{ mm}$
Počet ložisek na 1 dráze	$n_K = 4$
Délka ložiska	$L_L = 240 \text{ mm}$
Šířky vedení (ložisek)	$B_i = 0,185 \ 0,056 \ 0,128 \text{ m}$
Součinitel únosnosti ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$k_{Fi} = 0,615 \ 0,64 \ 0,63$
Součinitel vodivosti ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$k_{Qi} = 14 \ 29,3 \ 16,8$
Plocha ložiska pro $i = 1 \dots 3$ (Obr. 18)	$A_i = 0,044 \ 0,013 \ 0,031 \text{ m}^2$
Zatížení saní – režim 1. hrubování (informativně – výchozí hodnoty pro stanovení max. zatížení dvojic ložisek):	
• Řezná síla:	
➤ Svislá složka řezné síly	$F = 200 \text{ kN}$
➤ Příčná složka řezné síly	$F_R = 160 \text{ kN}$
➤ Podélná složka řezné síly	$F_A = 160 \text{ kN}$
• Vektor polohy řezné síly	$r\mathbf{1} = -450 \ 740 \ 1055 \text{ mm}$
• Tíha lamely 1 a 2	$F_2 = F_4 = 16 \text{ kN}$
• Vektor polohy tíhy lamely 1	$r\mathbf{2} = -408 \ 19 \ 0 \text{ mm}$
• Vektor polohy tíhy lamely 2	$r\mathbf{4} = 408 \ 70 \ 0 \text{ mm}$
• Tíha horního suportu a příčných saní	$F_3 = 40 \text{ kN}$
• Vektor polohy tíhy suportu a příčných saní	$r\mathbf{3} = 0 \ 120 \ 0 \text{ mm}$
Max. zatížení stanovené z režimu 1. hrubování:	
• Dvojice ložisek vedení A – B v záporném smyslu souřadnic ( $\varepsilon_1$ )	$F_{1M} = -51 \text{ kN}$
• Dvojice ložisek vedení A – B v kladném smyslu souřadnic ( $\varepsilon_2$ )	$F_{2M} = -17 \text{ kN}$
• Dvojice ložisek vedení C	$F_{3M} = 46,2 \text{ kN}$
Kinematická viskozita oleje (ISO HV68/40°C)	$\nu = 6,8 * 10^{-5} \text{ m}^2 * \text{s}^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,9 * 10^3 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_0$	$h_0 = 0,03 \text{ mm}$
Rozsah relativního posunutí saní ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )	$\varepsilon \in \langle \varepsilon_1, \varepsilon_2 \rangle, \varepsilon_1 = -0,5, \varepsilon_2 = 0,5$
Program pro návrh hydrostatického vedení	[ 11 ]
Program pro kontrolu navrženého hydrostatického vedení při různých zatíženích	[13]
Program pro stanovení zatížení dvojice hydrostatických ložisek ze zatížení vedení	[14]

Stanovit:

- Tlak  $p_c$  čerpadla
- Proud  $Q_c$  a výkon  $P_c$  čerpadla
- Tlakové předpětí  $p_{01}, p_{02}, p_{03}$



➤ Počáteční tuhost předepnuté dvojice ložisek  $k_{l2}(0)$

## Ložiska 1, 2

Tlakové předpětí ložiska 1 se určí ze vztahů:  $p_{01.1} = \frac{-F_{1M}}{A_1 * k_{F1} \left[ \frac{1}{(1+\varepsilon_1)^3} - \frac{1}{(1-\varepsilon_1)^3} \right]} \dots (171)$ ,

$$p_{01.2} = \frac{-F_{2M}}{A_1 * k_{F1} \left[ \frac{1}{(1+\varepsilon_2)^3} - \frac{1}{(1-\varepsilon_2)^3} \right]} \dots (172), \quad p_{01} = \max(p_{01.1}, p_{01.2}) \dots (173),$$

Tlakové předpětí ložiska 2 je poté dáno vztahy:  $p_{02} = \frac{p_{01}}{\phi} \dots (174)$ ,  $\phi = \frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{A_2 k_{F2}}{A_1 k_{F1}} \dots (128)$ ,

Max. tlak v ložisku 1 je dán vztahem  $p_1(\varepsilon_{1.1}) = \frac{p_{01}}{(1+\varepsilon_{1.1})^3} \dots (180)$  pro  $\varepsilon_{1.1} = \varepsilon_1 = -0,5$ :

$\phi = 0,315$
$p_{01.1} = 0,24 \text{ MPa}$
$p_{01.2} = -0,08 \text{ MPa}$

Tlakové předpětí ložiska 1	$p_{01} = 0,24 \text{ MPa}$
Tlakové předpětí ložiska 2	$p_{02} = 0,77 \text{ MPa}$
Max. tlak v ložisku 1	$p_1(-0,5) = 1,94 \text{ MPa}$

Maximální tlak v ložisku 2 se stanoví pomocí vztahů procedury programu [ 3 ]:

$$C_2(\varepsilon_{2.1}) = p_{01} \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{(1+\varepsilon_{2.1})^3} - \frac{A_1 * k_{F1}}{(1-\varepsilon_{2.1})^3} \right) + F_{2M} \dots (177),$$

$$\varepsilon_{2.1} = \text{root}[C_2(\varepsilon_{2.1}), \varepsilon_{2.1}, -0,5, 0,5] \dots (178),$$

$\varepsilon_{1.1} = 0$ , když  $p_{01.1} \leq 0$ ,  $\varepsilon_{2.1} = 0$ , když  $p_{01.2} \leq 0 \dots (179)$ :

$\varepsilon_{2.1} = 0$
-------------------------

Max. tlak v ložisku 2 je poté dán vztahem  $p_2(\varepsilon_{2.1}) = \frac{p_{01}}{(1-\varepsilon_{2.1})^3} \dots (181)$ :

$p_2(\varepsilon_{2.1}) = 0,77 \text{ MPa}$
---

## Ložiska 3, 4

Tlakové předpětí ložiska 3 se určí ze vztahu  $p_{03} = \frac{-F_{3M}}{A_3 * k_{F3} \left[ \frac{1}{(1+\varepsilon_2)^3} - \frac{1}{(1-\varepsilon_2)^3} \right]} \dots (182)$

$p_{03} = 0,3 \text{ MPa}$
----------------------------

Maximální tlak:  $p_3(\varepsilon_2) = \frac{p_{03}}{(1-\varepsilon_2)^3} \dots (183)$

$p_3(\varepsilon_2) = 2,47 \text{ MPa}$
---

## Vedení

Maximální tlak vedení tj. ložisek 1, 2, 3, 4 je poté dán vztahem:

$$p_M = \max(p_1(\varepsilon_{1,1}), p_2(\varepsilon_{2,1}), p_3(\varepsilon_2)) \dots \dots \dots (184)$$

$$p_M = 0,3 \text{ MPa}$$

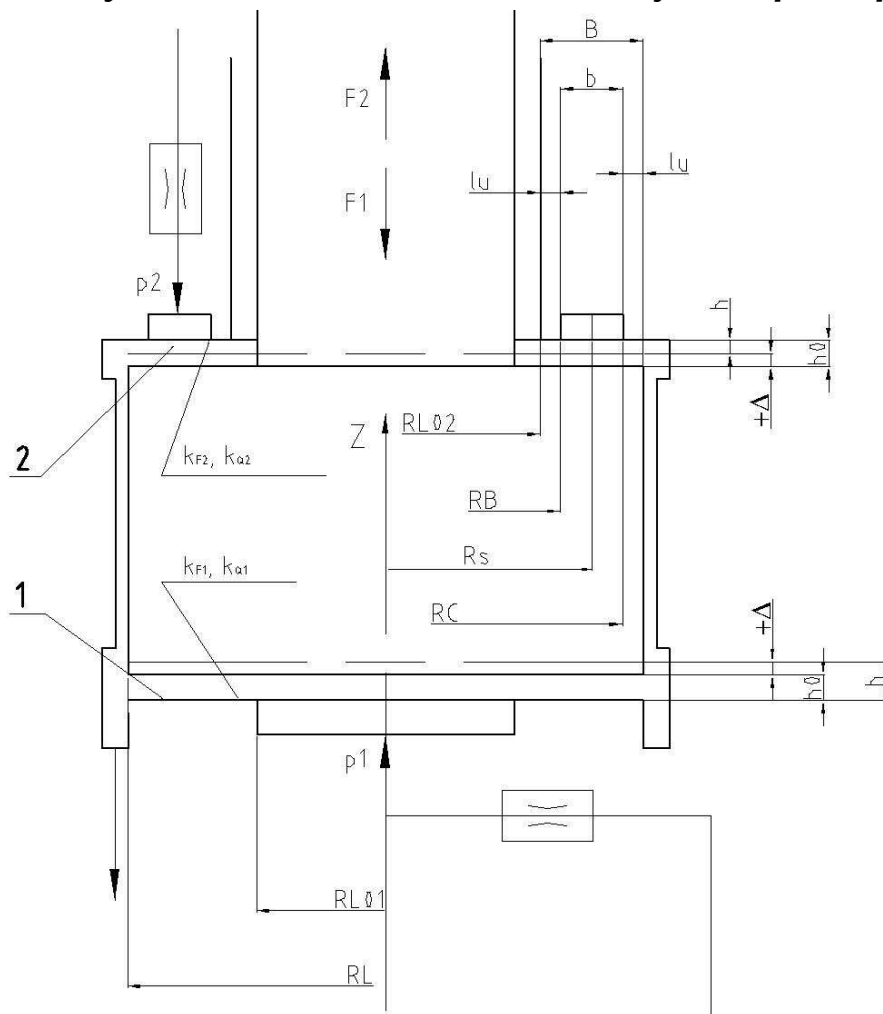
## Tlak čerpadla

$$p_c = p(\varepsilon_1) + 1 \text{ MPa} \dots \dots \dots (56)$$

$$p_c = 1,3 \text{ MPa}$$

## 2 Hydrostatické vedení rovinné kruhového pohybu

### 2.1 Hydrostatická ložiska axiální vzájemně předepnutá



**Obr. 27** – Axiální ložisko předepnuté.

Hydrostatické ložisko *I* (Obr. 27 – **Axiální ložisko předepnuté**) je určeno těmito rozměry:

- $R_L$  [m] ..... jmenovitý poloměr ložiska
- $R_{L01}$  [m] ..... poloměr komory

Poměr jmenovitého k minimálnímu poloměru ložiska *I* je dán vztahem:

$$\rho_1 = \frac{R_L}{R_{L01}} \dots\dots\dots (193)$$

$\rho_1 = 1,1 - 1,4 \dots$  rozsah hodnot

Součinitelé únosnosti a průtoku, plocha ložiska 1 jsou dány vztahy:

$$k_{F1} = \frac{1 - \frac{1}{\rho_1^2}}{2 \ln \rho_1} \dots\dots\dots (194)$$

$$k_{Q1} = \frac{2\pi}{\ln \rho_1} \dots\dots\dots (195)$$

$$A_1 = \pi R_L^2 \dots\dots\dots (196)$$

Hydrostatické ložisko 2 (Obr. 27 – **Axiální ložisko předepnuté**) je určeno těmito rozměry:

$R_L$  [m] ..... jmenovitý poloměr ložiska

$R_{L02}$  [m] ..... min. poloměr ložiska

Poměr jmenovitého k minimálnímu poloměru ložiska 2

$$\rho_2 = \frac{R_L}{R_{L02}} \dots\dots\dots (197)$$

$\rho_2 = 1,1 - 1,4 \dots$  rozsah hodnot

$$R_L = R_{L02} + B \dots\dots\dots (198)$$

Z těchto vztahů vyplývá:

Šířka plochy ložiska:

$$B = \left(1 - \frac{1}{\rho_2}\right) R_L \dots\dots\dots (199)$$

Šířka komory ložiska je určena vztahem:

$$b = 0,6B \dots\dots\dots (200)$$

Pro výpočet součinitelů únosnosti a průtoku ložiska je nutné stanovit:

$$R_s = R_L - \frac{B}{2} \dots\dots\dots (201)$$

$$R_B = R_s - \frac{b}{2} \dots\dots\dots (202)$$

$$R_C = R_s + \frac{b}{2} \dots\dots\dots (203)$$

Součinitelé únosnosti a průtoku, plocha ložiska 2 jsou dány vztahy:

$$k_{F2} = \frac{\frac{R_L^2 - R_C^2}{\ln\left(\frac{R_L}{R_C}\right)} - \frac{R_B^2 - R_{L02}^2}{\ln\left(\frac{R_B}{R_{L02}}\right)}}{2(R_L^2 - R_{L02}^2)} \dots\dots\dots (204)$$

$$k_{Q2} = 2\pi \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{R_L}{R_C}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{R_B}{R_{L02}}\right)} \right) \dots\dots\dots (205)$$

Plocha ložiska:

$$A_2 = \pi(R_L^2 - R_{L02}^2) \dots\dots\dots (206)$$

Poměr předepínacích tlaků v ložiskách je poté dán součinitelem  $\phi: \phi = \frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{A_2 k_{F2}}{A_1 k_{F1}}$

..... (128)

Výpočet ložisek se provádí obdobně jako u přímočarých vedení (Kap. 1.9).

Dílčí a celkový třecí výkon ložisek 1 a 2 je dán vztahy:

$$F_T = \frac{A - A_k}{h_0(1 + \varepsilon)} \eta * v_1 \dots\dots (44), P_T = F_T * v_1 \dots\dots (46), h = h_0 + \Delta \dots\dots (27)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{h_0} \dots\dots\dots (28)$$

tj.: pro mezikružší  $A_m$  o poloměru  $r$  a šířce  $dr$  se stanoví:

$$dF_T = \eta * dA_m * \frac{v}{h}$$

$$dA_m = 2\pi r * dr$$

$$dM_T = r * dF_T$$

$$dP_T = dM_T * \omega$$

$$v = r * \omega$$

Z těchto výrazů plyne:

$$P_{T1} = \frac{\pi\eta\omega^2}{2h_0(1 + \varepsilon)} (R_L^4 - R_{L01}^4) \dots\dots\dots (207)$$

$$P_{T2} = \frac{\pi\eta\omega^2}{2h_0(1 - \varepsilon)} (R_L^4 - R_{L02}^4 + R_B^4 - R_C^4) \dots\dots\dots (208)$$

$$P_{Tc} = P_{T1} + P_{T2} \dots\dots\dots (209)$$

**Př.: 9 - Hydrostatické ložisko kruhového pohybu s regulací kapilárami (G<sub>R</sub> = konst.)**

Dáno:

Jmenovitý průměr ložiska	$R_L = 130 \text{ mm}$
Součinitel poloměrů ložiska 1 a 2 - počáteční hodnota	$\rho_1 = \rho_2 = 1,4$
Součinitel vodivosti kapiláry ložiska rozměru 2 (Obr. 27)	$\kappa_2 = 1,5$
Zatížení ložiska:	
• Vnější síla působící v záporném smyslu	$F_1 = -250 \text{ kN}$
• Vnější síla působící v kladném smyslu	$F_2 = 125 \text{ kN}$
Otáčky čepu při zatížení $F_1, F_2$	$n_1 = 250 \text{ min}^{-1}$
Kinematická viskozita oleje (ISO HV68/40°C)	$\nu = 6,8 * 10^{-5} \text{ m}^2 * \text{s}^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,9 * 10^3 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$

Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_0$	$h_0 = 0,03 \text{ mm}$
Rozsah relativního posunutí saní ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )	$\varepsilon \in \langle \varepsilon_1, \varepsilon_2 \rangle, \varepsilon_1 = -0,4, \varepsilon_2 = 0,4$

Stanovit:

- Tlak  $p_c$  čerpadla
- Proud  $Q_c$  a výkon  $P_c$  čerpadla
- Tlakové předpětí  $p_{01}, p_{02}, p_{03}$
- Počáteční tuhost předepnuté dvojice ložisek  $k_{12}(0)$

Rozměry ložiska 1 a 2 se stanoví pomocí vztahů:

$$\rho_1 = \frac{R_L}{R_{L01}} \dots \dots \dots (193)$$

$$\rho_2 = \frac{R_L}{R_{L02}} \dots \dots \dots (197)$$

$R_{L01} = R_{L02} = 93 \text{ mm}$
-------------------------------------

Šířka plochy ložiska dle  $B = \left(1 - \frac{1}{\rho_2}\right) R_L \dots \dots \dots (199)$ , šířka komory  $b = 0,6B \dots \dots \dots (200)$ ,

poloměry komory

$$R_B = R_s - \frac{b}{2} \dots \dots \dots (202), R_C = R_s + \frac{b}{2} \dots \dots \dots (203)$$

$B = 37 \text{ mm}$
$b = 22 \text{ mm}$
$R_B = 122,5 \text{ mm}$
$R_C = 144,5 \text{ mm}$

Součinitelé únosnosti a průtoku, plochy pro ložiska 1 a 2 jsou dány vztahy:

$$k_{F1} = \frac{1 - \frac{1}{\rho_1^2}}{2 \ln \rho_1} \dots \dots \dots (194), k_{Q1} = \frac{2\pi}{\ln \rho_1} \dots \dots \dots (195), A_1 = \pi R_L^2 \dots \dots \dots (196),$$

$$k_{F2} = \frac{\frac{R_L^2 - R_C^2}{\ln\left(\frac{R_L}{R_C}\right)} - \frac{R_B^2 - R_{L02}^2}{\ln\left(\frac{R_B}{R_{L02}}\right)}}{2(R_L^2 - R_{L02}^2)} \dots \dots \dots (204), k_{Q2} = 2\pi \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{R_L}{R_C}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{R_B}{R_{L02}}\right)} \right) \dots \dots \dots (205),$$

$$A_2 = \pi(R_L^2 - R_{L02}^2) \dots \dots \dots (206)$$

$A_1 = 0,053 \text{ m}^2$
$A_2 = 0,026 \text{ m}^2$
$k_{F1} = 0,729$
$k_{F2} = 0,729$

Tlak čerpadla se stanoví pomocí vztahů:

$$p_{c12.1} = \frac{-F_{1M}}{\frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_1)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_1)^3}} \dots\dots\dots (139)$$

$$p_{c12.2} = \frac{-F_{2M}}{\frac{A_1 * k_{F1}}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon_2)^3} - \frac{A_2 * k_{F2}}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon_2)^3}} \dots\dots\dots (140)$$

$$p_c = \max(p_{c12.1}, p_{c12.2}) \dots\dots\dots (210)$$

$p_c = 14 \text{ MPa}$
------------------------

Předpětí ložisek je dáno vztahy:

$$\kappa_2 = \frac{p_c}{p_{02}} = 1,5 \dots\dots\dots (130)$$

$p_{02} = 9,3 \text{ MPa}$
----------------------------

$$\phi = \frac{p_{01}}{p_{02}} = \frac{A_2 k_{F2}}{A_1 k_{F1}} \dots\dots\dots (128)$$

$\phi = 0,534$
----------------

$$\phi = \frac{p_{01}}{p_c} \frac{p_c}{p_{02}} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \dots\dots\dots (131)$$

$\kappa_1 = 2,8$
------------------

$$p_{0i} = \frac{p_c}{\kappa_i} \dots\dots\dots (132)$$

$p_{01} = 5 \text{ MPa}$
--------------------------

Předpětí a tuhost ložisek se stanoví ze vztahů:

$$F_0 = p_{0i} * A_i * k_{F.i} \dots (145), k(0)_i = 3 \frac{F_0}{h_0} \left(1 - \frac{1}{\kappa_i}\right) \dots\dots\dots (144),$$

$$k(0)_{12} = k(0)_1 + k(0)_2 = 3 \frac{F_0}{h_0} \left(2 - \frac{1}{\kappa_1} - \frac{1}{\kappa_2}\right) \dots\dots\dots (146)$$

$F_0 = 193 \text{ kN}$
$k(0)_1 = 7453 \text{ kN/mm}$
$k(0)_2 = 3900 \text{ kN/mm}$
$k(0)_{12} = 11310 \text{ kN/mm}$

Pásmo posunutí  $\varepsilon \in \langle \varepsilon_{1.1} | \varepsilon_{2.1} \rangle$  ve vztahu k vnějšímu zatížení  $F_{1M}, F_{2M}$ , ve kterém je režim hydrostatiky platný se stanoví pomocí procedury programu [ 3] s využitím

$$C_1(\varepsilon_{1.1}) = p_{01} \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{(1 + \varepsilon_{1.1})^3} - \frac{A_1 * k_{F1}}{(1 - \varepsilon_{1.1})^3} \right) + F_{1M} \dots (175), \varepsilon_{1.1} = \text{root}[C_1(\varepsilon_{1.1}), \varepsilon_{1.1}, -0,5, 0,5]$$

$$\dots\dots\dots (176), C_2(\varepsilon_{2.1}) = p_{01} \left( \frac{A_1 * k_{F1}}{(1 + \varepsilon_{2.1})^3} - \frac{A_1 * k_{F1}}{(1 - \varepsilon_{2.1})^3} \right) + F_{2M} \dots (177),$$

$$\varepsilon_{2.1} = \text{root}[C_2(\varepsilon_{2.1}), \varepsilon_{2.1}, -0,5, 0,5] \dots\dots\dots (178)$$

$\varepsilon_{1.1} = -0,375$
$\varepsilon_{1.2} = 0,265$

Proud protékající ložisky a hydraulický výkon jsou dány vztahy:

$$p_1 = \frac{P_c}{1 + (\kappa_1 - 1)(1 + \varepsilon)^3} \dots (147), \quad p_2 = \frac{P_c}{1 + (\kappa_2 - 1)(1 - \varepsilon)^3} \dots (148), \quad \eta = \rho * v \dots (3),$$

$$Q_1 = \frac{p_1 * h_0^3 * (1 + \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q1} \dots (151), \quad Q_2 = \frac{p_2 * h_0^3 * (1 - \varepsilon)^3}{12 * \eta} * k_{Q2} \dots (152),$$

$$Q_c = Q_{12} = Q_1 + Q_2 \dots (155),$$

$$P_{Hc} = Q_c * p_c \dots (160)$$

Třecí výkon těmito vztahy:

$$\omega = 2\pi n_1$$

$$P_{T1} = \frac{\pi \eta \omega^2}{2h_0(1 + \varepsilon)} (R_L^4 - R_{L01}^4) \dots (207), \quad P_{T2} = \frac{\pi \eta \omega^2}{2h_0(1 - \varepsilon)} (R_L^4 - R_{L02}^4 + R_B^4 - R_C^4) \dots (208),$$

$$P_{Tc} = P_{T1} + P_{T2} \dots (209)$$

Celkový výkon je dán:

$$P_{Lc} = P_{Hc} + P_{Tc} \dots (211)$$

Výčíslení se provede pro  $\varepsilon_{1,1} = -0,375$ ,  $\varepsilon_{1,2} = 0,265$  kde dochází k max. zatížení  $F_{1M}$ ,  $F_{2M}$ :

$Q_c(\varepsilon_1) = 13,1 \text{ l/min}$	$Q_c(\varepsilon_2) = 4,3 \text{ l/min}$
$P_{Hc}(\varepsilon_1) = 3 \text{ kW}$	$P_{Hc}(\varepsilon_2) = 1 \text{ kW}$
$P_{T1}(\varepsilon_1) = 1,77 \text{ kW}$	$P_{T1}(\varepsilon_2) = 0,88 \text{ kW}$
$P_{Tc}(\varepsilon_1) = 8,4 \text{ kW}$	$P_{Tc}(\varepsilon_2) = 0,6 \text{ kW}$
$P_{Lc}(\varepsilon_1) = 5,1 \text{ kW}$	$P_{Lc}(\varepsilon_2) = 2,5 \text{ kW}$

Pro optimalizaci konstrukce ložiska vzhledem k celkovému výkonu se stanoví poměry:

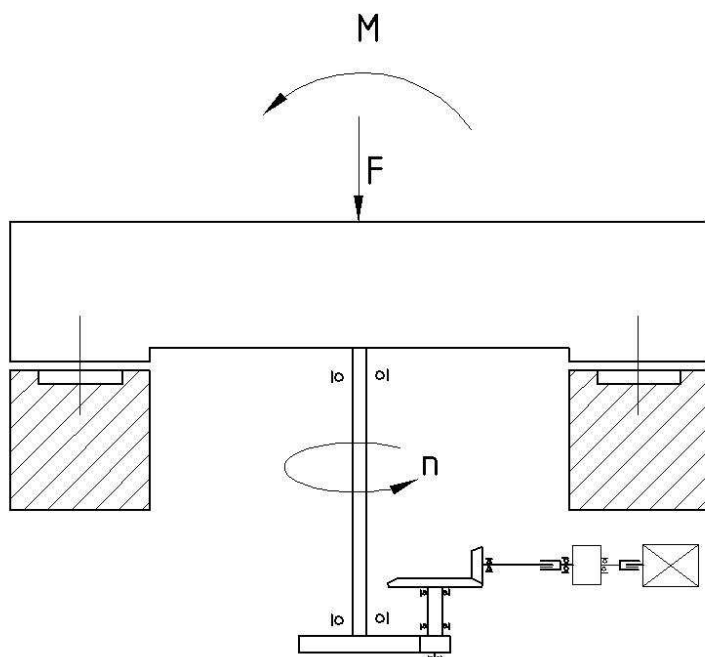
Poměr třecího k celkovému výkonu	$\frac{P_{Tc}(\varepsilon_1)}{P_{Lc}(\varepsilon_1)} = 0,4$	$\frac{P_{Tc}(\varepsilon_2)}{P_{Lc}(\varepsilon_{21})} = 0,6$
Poměr třecího výkonu ložiska $l$ k celkovému třecímu výkonu	$\frac{P_{T1}(\varepsilon_1)}{P_T(\varepsilon_1)} = 0,84$	$\frac{P_{T1}(\varepsilon_2)}{P_T(\varepsilon_2)} = 0,58$

Z výsledků vyplývá velký podíl třecího výkonu ložiska  $l$ . Snížení celkového výkonu se zřejmě dosáhne zmenšením  $\rho_l$  v pásmu  $\rho_l = 1,1 - 1,4$ .

## 2.2 Hydrostatická ložiska rovinná pro přenos axiální síly a klopného momentu s regulací $Q = \text{konst.}$

Hydrostatická ložiska rovinná velkého průměru jsou využívána pro uložení desek svislých soustruhů a otočných stolů dále pro uložení mlýnů na rudy a otočných antén. Kromě axiální síly přenášejí tato ložiska i klopný moment (Obr. 28).

Jsou tvořena jednou nebo větším počtem drah. Větší počet drah umožňuje podepřít celou plochu desky a tím zmenšit její deformaci – toto řešení se používá především u otočných stolů.



Obr. 28 – Hydrostatické ložisko rovinné zatížené axiální silou a klopným momentem

### 2.2.1 Rozměry a součinitelé ložisek

Hydrostatické ložisko (Obr. 29) je určeno těmito rozměry:

- $R_{Lj}$  [m] ..... jmenovitý poloměr  $j$ -té dráhy
- $R_{L0j}$  [m] ..... vnitřní poloměr  $j$ -té dráhy
- $R_{sj}$  [m] ..... střední poloměr  $j$ -té dráhy
- $B_j$  [m] ..... šířka  $j$ -té dráhy
- $b_j$  [m] ..... šířka komory  $j$ -té dráhy
- $\alpha_{kom,j}$  ..... úhel komory  $j$ -té dráhy
- $\alpha_j$  ..... úhel segmentu ložiska  $j$ -té dráhy
- $n_{Kj}$  ..... počet segmentů (komor)  $j$ -té dráhy
- $j = 1 \dots n_D$  ..... počet drah
- $n_{1,2}$  ..... otáčky ložiska (1. a 2. stupeň)

Střední průměr je dán vztahem  $R_s = R_L - \frac{B}{2}$  ..... ( 201 )

Charakteristické údaje ložiska jsou:

- Poměr šířky dráhy ložiska k jeho průměru

$$k_{Bj} = \frac{B_j}{2R_{Lj}} \dots\dots\dots ( 212 )$$

- Poměr šířky komory k šířce dráhy ložiska

$$k_{bj} = \frac{b_j}{B_j} \dots\dots\dots ( 213 )$$

V [ 8 ] je provedena normalizace těchto hodnot tj.:

- $k_B = 0,05 \quad 0,1 \quad 0,15 \quad 0,2$
- $k_b = 0,6$

Dále:



$$R_{s_j} * \left( \frac{2\pi}{n_{Kj}} - \alpha_{komj} \right) = B_j - b_j \dots \dots \dots (214)$$

Součinitelé únosnosti a průtoku poté byly řešeny pro tuto normu a jsou uvedeny v tabulce.

**Tab. 2 – Součinitelé únosnosti a průtoku [ 8]**

$k_b = 0,6$	$n_K = 8$		$n_K = 12$	
$k_B$	$k_F$	$k_Q$	$k_F$	$k_Q$
0,05	0,796	70,73	0,788	46,54
0,1	0,788	32,54	0,771	20,43
0,15	0,781	19,71	0,767	12,57
0,2	0,774	13,19	0,756	7,7

Následně lze vyjádřit:

$$R_{L0j} = R_{Lj} (1 - 2k_{Bj}) \dots \dots \dots (215)$$

$$R_{s_j} = R_{Lj} (1 - k_{Bj}) \dots \dots \dots (216)$$

$$B_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} \dots \dots \dots (217)$$

$$b_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} * k_{bj} \dots \dots \dots (218)$$

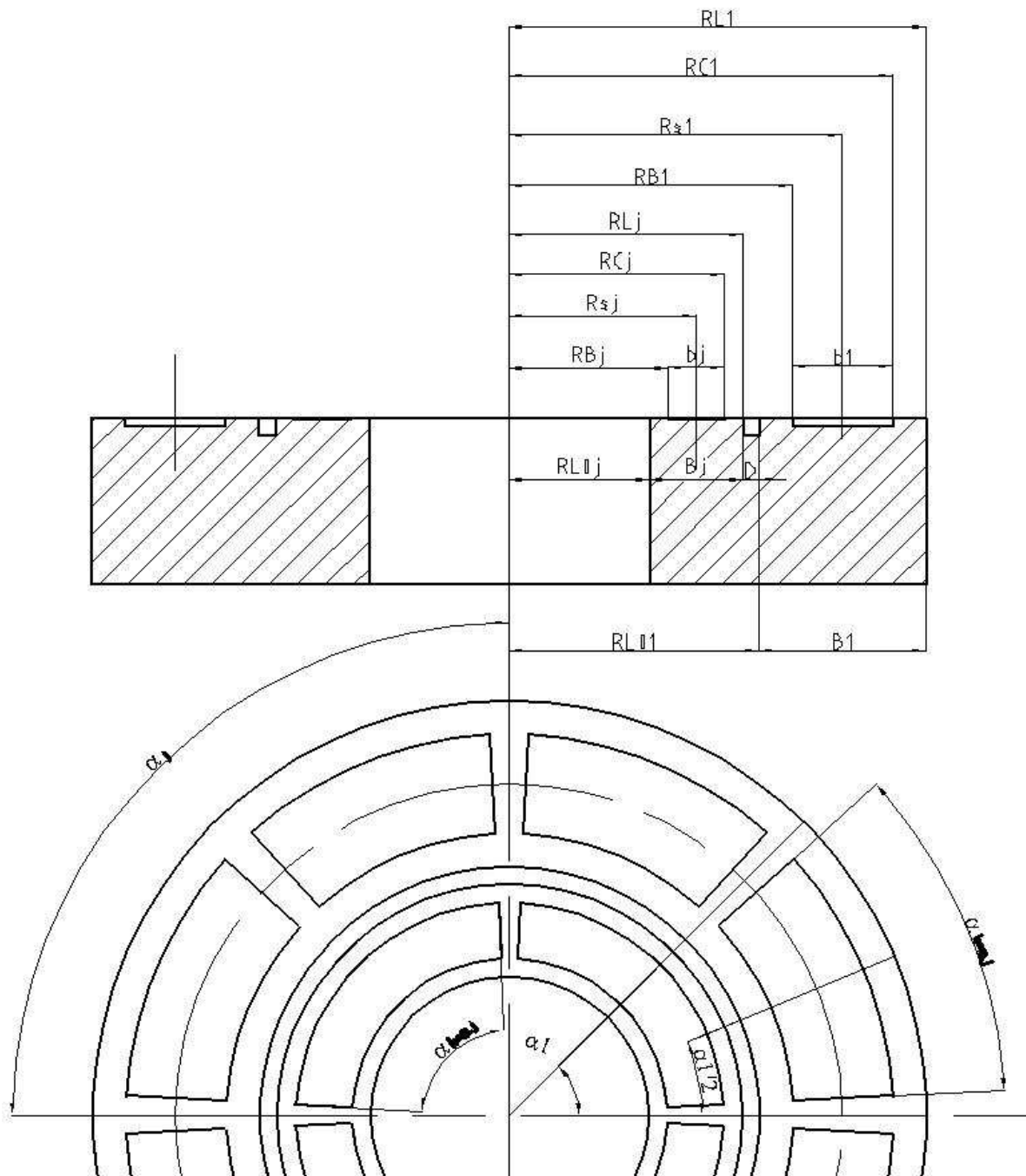
Pokud nelze použít uvedenou normu např. z prostorových důvodů, stanoví se součinitelé únosnosti  $k_{Fj}$  a průtoku  $k_{Qj}$  pro  $R_{Lj}$ ,  $R_{L0j}$ ,  $R_{Cj}$ ,  $R_{Bj}$  z těchto vztahů:

$$k_{F2} = \frac{\frac{R_L^2 - R_C^2}{\ln\left(\frac{R_L}{R_C}\right)} - \frac{R_B^2 - R_{L02}^2}{\ln\left(\frac{R_B}{R_{L02}}\right)}}{2(R_L^2 - R_{L02}^2)} \dots \dots (204), \quad k_{Q2} = 2\pi \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{R_L}{R_C}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{R_B}{R_{L02}}\right)} \right) \dots \dots (205).$$

Tyto vztahy lze poté s využitím  $R_B = R_s - \frac{b}{2} \dots \dots \dots (202)$ ,

$$R_C = R_s + \frac{b}{2} \dots \dots (203) \text{ upravit na výraz s proměnnými veličinami } k_B \text{ a } k_b:$$

$$k_{Fj} = \frac{1 - k_{bj}}{8(1 - k_{Bj})} \left[ \frac{2 - k_{Bj}(1 - k_{bj})}{\ln\left(\frac{1}{1 - k_{Bj}(1 - k_{bj})}\right)} - \frac{2 - k_{Bj}(3 + k_{bj})}{\ln\left(\frac{1 - k_{Bj}(1 + k_{bj})}{1 - 2k_{Bj}}\right)} \right] \dots \dots \dots (219)$$



**Obr. 29 – Rozměry hydrostatického ložiska**

$$k_{Qj} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} \left[ \frac{1}{\ln \frac{1}{1 - k_{Bj}(1 - k_{bj})}} + \frac{1}{\ln \frac{1 - k_{Bj}(1 + k_{bj})}{1 - 2k_{Bj}}} \right] \dots \dots \dots (220)$$

Z porovnání vypočtených hodnot s údaji v Tab. 2 se zjistí odchylky pro  $k_{Fj}$  v rozsahu 0,5 – 3,3%, pro  $k_{Qj}$  v rozsahu 5 – 19%. Tato přesnost výpočtu je přijatelná.

Pro vyšší obvodové rychlosti  $v_{RL} > 0,5$  m/s je vhodné volit součinitel  $k_{Bj} = \frac{B_j}{2R_{Lj}} < 0,2$ ; sníží se

tím třecí výkon. Obvykle je výhodnější použít pouze 8 komor.

Další veličiny jsou dány vztahy:

- Úhel segmentu  $j$ -té dráhy ložiska:

$$\alpha_j = \frac{2\pi}{n_{Kj}} \dots \dots \dots (221)$$

- Úhel komory  $j$ -té dráhy ložiska:

Ze vztahu  $R_{sj} * \left( \frac{2\pi}{n_{Kj}} - \alpha_{komj} \right) = B_j - b_j \dots \dots \dots (214)$  vyplývá:

$$\alpha_{komj} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} - \frac{B_j - b_j}{R_{sj}} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} - 2k_{Bj} \frac{1 - k_{bj}}{1 + k_{bj}} \dots \dots \dots (222)$$

- Plocha segmentu  $j$ -té dráhy ložiska včetně komory a můstku

$$A_j = \frac{\alpha_j}{2} (R_{Lj}^2 - R_{L0j}^2) \dots \dots \dots (223)$$

Celková plocha  $j$ -té dráhy ložiska

$$A_{cj} = A_j * n_{Kj} \dots \dots \dots (224)$$

- Plocha komory  $j$ -té dráhy ložiska

$$A_{kj} = R_{sj} * \alpha_{komj} * b_j \dots \dots \dots (225)$$

- Celková plocha komor  $j$ -té dráhy ložiska

$$A_{kcj} = A_{kj} * n_{Kj} \dots \dots \dots (226)$$

- Poloha komor

Úhlové souřadnice komor  $j$ -té dráhy ložiska pro  $i = 1 \dots n_j$  jsou dány vztahy:

$$\delta_{ji} = \frac{\alpha_j}{2} + (i-1)\alpha_j \dots \dots \dots (227)$$

### 2.2.2 Počáteční podmínky ložiska

- Počáteční tlak v komorách  $p_0$  při předepnutí ložiska silou  $F_0$  se odvodí ze vztahu

$$p_0 = \frac{F_0}{A * k_F} \dots \dots (22) \text{ pro zatížení celkové plochy ložiska sestávajícího z } n_D \text{ dráh}$$

tj.:

$$p_0 = \frac{F_0}{\sum_{j=1}^{nD} A_j * k_{Fj}} \dots \dots \dots (228)$$

- Počáteční vodivost dle vztahu  $G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta}$  ..... ( 21 )
- Proud segmentem  $j$ -té dráhy ložiska se součinitelem průtoku  $k_{Qj}$  dle vztahu  $Q_0 = p_0 * G_0 * k_{Qj} \dots$  ( 24 )
  - Celkový proud protékající  $n_D$ - dráhami ložiska je následně dán vztahem:

$$Q_c = p_0 * G_0 \sum_{j=1}^{n_D} k_{Qj} * n_{Kj} \dots \dots \dots ( 229 )$$

### 2.2.3 Zatížení

Hydrostatické axiální ložisko je zatíženo předpětím  $F_0$ , které je obvykle dáno tíhou stolu případně silou axiálního ložiska.

Celkové zatížení ložiska je dáno axiální silou  $F$  a momentem  $M$  dle vztahů:

$$F = F_0 + F_Q \dots \dots \dots ( 230 )$$

$$M = F_Q * a_F \dots \dots \dots ( 231 )$$

- $F_0$  ..... předpětí
- $F_Q$  ..... vnější zatížení (od tíhy obrobku, řezných sil)
- $a_F$  ..... vzdálenost  $F_Q$  od osy ložiska

### 2.2.4 Tlak v ložisku při zvedání desky

Při zvedání desky z dosedu je nutné vyvodit tlak

$$p_{cz} = \frac{F}{\sum_{j=1}^{n_D} A_{kcj}} \dots \dots \dots ( 232 )$$

### 2.2.5 Tloušťka olejového filmu, posunutí a sklon desky, tlaky v komorách a tlak čerpadla

Počáteční tloušťka olejového filmu se volí v závislosti na max. rychlosti na obvodě ložiska vztažené k ustálené teplotě ložiska  $t_n$  – pro  $v_{RL} \leq 1\text{m/s}$ :  $h_0 = 0,03$  mm. Při větších rychlostech se tloušťka filmu  $h_0$  zvětšuje v závislosti na vypočteném proudu, hydraulickém a třecím výkonu ložiska. Optimální poměr hydraulického a třecího výkonu se určí z požadavků na prostor a náklady příslušných zařízení (hydraulický agregát, chladicí zařízení).

#### 2.2.5.1 Centrické zatížení ložiska

Při centrickém zatížení je  $M = 0$ ,  $F > 0$ , platí tedy vztahy pro tlak a poměrné posunutí:

$$p_{01} = \frac{F}{\sum_{j=1}^{n_D} A_{cj} * k_{Fj}} \dots \dots \dots ( 233 )$$

Při využití

$$\varepsilon_M = \left( \frac{p_0}{p_M} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \dots \text{e stanoví poměrné posunutí v ose ložiska pro } \varepsilon_M = \varepsilon_{01}, p_M = p_{01} \text{ tj.:}$$

$$\varepsilon_{01} = \left( \frac{p_0}{p_{01}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \dots \dots \dots (234)$$

### 2.2.5.2 Excentrické zatížení ložiska

Při excentrickém zatížení, kdy je  $M > 0$ ,  $F > 0$ , byly v [ 8] odvozeny tyto nelineární algebraické rovnice pro neznámé  $H$  a  $\psi$ :

$$F = \frac{12\eta * Q_0 * A * k_F}{k_Q} \sum_{i=1}^{nK} \frac{1}{(H - R_s \psi \cos \delta_i)^3} = f(H, \psi) \dots \dots \dots (235)$$

$$M = R_s \frac{12\eta * Q_0 * A * k_F}{k_Q} \sum_{i=1}^{nK} \frac{\cos \delta_i}{(H - R_s \psi \cos \delta_i)^3} = g(H, \psi) \dots \dots \dots (236)$$

V těchto rovnicích jsou:

$H$  ... pomyslná tloušťka olejového filmu v ose ložiska

$\psi$  ... sklon desky

Pro větší počet ložiskových drah  $j = 1 \dots n_D$  se předchozí rovnice upraví takto:

$$F - \left[ C1_1 \sum_{i=1}^{nK1} \frac{1}{(H - R_{s1} \psi \cos \delta_{1i})^3} + \dots + C1_j \sum_{i=1}^{nKj} \frac{1}{(H - R_{sj} \psi \cos \delta_{ji})^3} + \dots \right] = 0 \dots (237)$$

$$C1_j = \frac{12\eta * Q_{0j} * A_j * k_{Fj}}{k_{Qj}} \dots \dots \dots (238)$$

$$M - \left[ C2_1 \sum_{i=1}^{nK1} \frac{\cos \delta_{1i}}{(H - R_{s1} \psi \cos \delta_{1i})^3} + \dots + C2_j \sum_{i=1}^{nKj} \frac{\cos \delta_{ji}}{(H - R_{sj} \psi \cos \delta_{ji})^3} \right] = 0 \dots \dots (239)$$

$$C2_j = R_{sj} * C1_j \dots \dots \dots (240)$$

Rovnice se řeší např. pomocí procedury programu [ 3].

Ze zjištěných hodnot  $H$  a  $\psi$ : se stanoví poměrné posunutí  $\varepsilon_{02}$  v ose ložiska a tloušťka olejového filmu na obvodě ložiska.

$$\varepsilon_{02} = \frac{H - h_0}{h_0} \dots \dots \dots (241)$$

Tloušťka olejového filmu na obvodu největší dráhy tj. poloměru  $R_{L1}$  je dána vztahem:

$${}^{obv}h_i = H - R_{L1} \psi \cos \delta_{1i} \dots \dots \dots (242)$$

Min. tloušťka a max. relativní posunutí na obvodu je poté dáno vztahy:

$${}^{obv}h_{\min} = \min({}^{obv}h_i) \dots \dots \dots (243)$$

$${}^{obv}\varepsilon_M = \frac{{}^{obv}h_{\min} - h_0}{h_0} \dots \dots \dots (244)$$

Tloušťka olejového filmu v  $i$ -té komoře ložiska 1 je dána vztahem:

$$h_i = H - R_{s1} \psi \cos \delta_{1i} \dots \dots \dots (245)$$

Tlak v  $i$  – té komoře ložiska 1:

$$p_{Li} = \frac{12\eta Q_{01}}{k_{Q1} * h_i^3} \dots \dots \dots (246)$$

Max. tlak je poté dán vztahem:

$$p_M = \max(p_{Li}) \dots \dots \dots (247)$$

Tlak čerpadla se následně stanoví dle  $p_c = p(\varepsilon_1) + 1MPa$  ..... (56) tj.:

$$p_c = \max(p_{01}, p_M, p_{cz}) + 1MPa \dots \dots \dots (248)$$

### 2.2.6 Hydraulický a třecí výkon ložiska

Hydraulický výkon ložiska:

$$P_{Hc} = Q_c * p_c \dots \dots \dots (249)$$

Třecí moment a výkon ložiska při zatížení  $F$  a poměrném posunutí  $\varepsilon = \varepsilon_{01}$  :

$$M_T(\varepsilon) = \frac{\pi\eta\omega}{2h_0(1+\varepsilon)} \sum_{j=1}^m (R_{Lj}^4 - R_{L0j}^4 + R_{Bj}^4 - R_{Cj}^4) \dots \dots \dots (250)$$

Poloměry  $R_{Bj}$ ,  $R_{Cj}$  se stanoví ze vztahů  $R_B = R_s - \frac{b}{2}$  .... (202),  $R_C = R_s + \frac{b}{2}$  ..... (203),

$$R_{sj} = R_{Lj}(1 - k_{Bj}) \dots \dots (216), B_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} \dots \dots (217), b_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} * k_{bj} \dots \dots (218)$$

Třecí výkon je následně:

$$P_T = M_T(\varepsilon) * \omega \dots \dots \dots (251)$$

#### Př.: 10 - Hydrostatické ložisko manipulátoru pro přenos axiální síly a momentu s regulací $Q = konst.$ )

Dáno:

Jmenovitý poloměr ložiska	$R_L = 1\,250$ mm
Poměr šířky ložiska k průměru	$k_B = 0,2$
Poměr šířky komory k šířce ložiska	$k_b = 0,6$
Počet komor na vodící dráze	$n_K = 8$
Počet drah ložiska	$n_D = 1$
Obr. 29 – Rozměry hydrostatického ložiska	
Zatížení ložiska:	
• Tíha stolu – předpětí ložiska	$F_0 = 5300$ kN
• Tíha obrobku	$F_Q = 2700$ kN
• Vyložení těžiště obrobku od osy rotace při $F_Q = 2700$ kN	$a_F = 100$ mm
• Otáčky desky při zatížení $F_0, F_Q$	$n_l = 10$ min <sup>-1</sup>
• Ustálená teplota při $n = 10$ min <sup>-1</sup>	$t_n = 40^\circ\text{C}$
Kinematická viskozita oleje (ISO HV46/40°C)	$\nu = 4,6 * 10^{-5} m^2 * s^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,87 * 10^3 kg * m^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_0$	$h_0 = 0,03$ mm

Přípustný rozsah relativního posunutí desky ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )	$\varepsilon \in \langle \varepsilon_{1D}, \varepsilon_{2D} \rangle, \varepsilon_{1D} = -0,4, \varepsilon_{2D} = 0,4$
---	---

Stanovit:

- Rozměry ložiska
- Tlakové předpětí v komoře ložiska  $p_0$
- Proud segmentem ložiska  $Q_0$  a ložiskem  $Q_c$
- Tloušťka olejového filmu na obvodě ložiska  $^{obv} h_{min}$
- Relativní posunutí desky v ose při centrickém  $\varepsilon_{01}$  a excentrickém zatížení  $\varepsilon_{02}$
- Sklon desky  $\psi$  a relativní posunutí desky na obvodu ložiska  $^{obv} \varepsilon_M$
- Max. tlak v komoře ložiska  $p_M$
- Tlak čerpadla  $p_c$
- Výkon čerpadla  $P_{Hc}$
- Třecí výkon ložiska  $P_T$

Z Tab. 2 – Součinitelé únosnosti a průtoku [ 8] se stanoví pro dané  $k_B = 0,2, n = 8$  součinitelé průtoku a únosnosti:

Součinitel únosnosti	$k_F = 0,774$
Součinitel průtoku	$k_Q = 13,19$

Pomocí vztahů  $R_{L0j} = R_{Lj} (1 - 2k_{Bj}) \dots (215), R_{sj} = R_{Lj} (1 - k_{Bj}) \dots (216),$

$B_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} \dots (217), b_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} * k_{bj} \dots (218)$  se stanoví:

$R_{L0} = 750$ mm
$R_s = 1000$ mm
$B = 500$ mm
$b = 300$ mm

Dále ze vztahů  $\alpha_j = \frac{2\pi}{n_{Kj}} \dots (221), A_j = \frac{\alpha_j}{2} (R_{Lj}^2 - R_{L0j}^2) \dots (223),$

$A_{cj} = A_j * n_{Kj} \dots :$

Úhel segmentu ložiska	$\alpha = 45^\circ$
Plocha segmentu ložiska	$A = 0,393$ m <sup>2</sup>
Celková plocha ložiska	$A_c = 3,14$ m <sup>2</sup>

Počáteční podmínky provozu ložiska jsou dány vztahy:

$$p_0 = \frac{F_0}{\sum_{j=1}^{nD} A_j * k_{Fj}} \dots (228), G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots (21), Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q \dots (24),$$

$$Q_c = p_0 * G_0 \sum_{j=1}^{nD} k_{Qj} * n_{Kj} \dots (229)$$

Počáteční tlak v komoře	$p_0 = 2,18$ MPa
Proud segmentem ložiska	$Q_0 = 0,1$ l/min
Celkový proud ložiska	$Q_c = 0,78$ l/min

Tlak v komoře při zvedání ložiska se určí pomocí vztahů:

$$\alpha_{komj} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} - \frac{B_j - b_j}{R_{sj}} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} - 2k_{Bj} \frac{1 - k_{Bj}}{1 + k_{Bj}} \dots\dots (222), A_{kj} = R_{sj} * \alpha_{komj} * b_j \dots\dots (255),$$

$$A_{kcj} = A_{kj} * n_{Kj} \dots\dots (226), p_{cz} = \frac{F}{\sum_{j=1}^{nD} A_{kcj}} \dots\dots (232)$$

Tlak v komoře při zvedání	$p_{cz} = 5,7 \text{ Mpa}$
---------------------------	----------------------------

Tlak a poměrné posunutí při centrickém zatížení se určí:

$$F = F_0 + F_Q \dots\dots\dots (230)$$

$$p_{01} = \frac{F}{\sum_{j=1}^{nD} A_{cj} * k_{Fj}} \dots\dots\dots (233), \epsilon_{01} = \left( \frac{p_0}{p_{01}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \dots\dots\dots (234)$$

Celková axiální síla	$F = 8\,000 \text{ kN}$
Tlak při centrickém zatížení	$p_{01} = 2,88 \text{ Mpa}$
Poměrné posunutí desky při centrickém zatížení	$\epsilon_{01} = -0,13$

Pro excentrické zatížení ( $M > 0, F > 0$ ) se stanoví pomyslná tloušťka olejového filmu v ose ložiska  $H$  a sklon desky  $\psi$  pomocí vztahů  $M = F_Q * a_F \dots\dots\dots (231)$ ,

$$F = \frac{12\eta * Q_0 * A * k_F}{k_Q} \sum_{i=1}^{nK} \frac{1}{(H - R_s \psi \cos \delta_i)^3} = f(H, \psi) \dots\dots\dots (235),$$

$$M = R_s \frac{12\eta * Q_0 * A * k_F}{k_Q} \sum_{i=1}^{nK} \frac{\cos \delta_i}{(H - R_s \psi \cos \delta_i)^3} = g(H, \psi) \dots\dots (236), \delta_{ji} = \frac{\alpha_j}{2} + (i-1)\alpha_j$$

$$\dots\dots\dots (227) \delta_{ji} = \frac{\alpha_j}{2} + (i-1)\alpha_j \dots\dots (227)$$

Pro řešení nelineárních algebraických rovnic pro neznámé  $H$  a  $\psi$  jedné dráhy ložiska se použije procedura programu [ 3] takto:

- Počáteční podmínky a parametry zatížení se upraví do bezrozměrného tvaru:

**Given**

$$H = h_0, \psi = 0$$

$$C_1 = \frac{12\eta * Q_0 * A * k_F}{k_Q} \dots\dots\dots (252)$$

$$C_2 = R_s * C_1 \dots\dots\dots (253)$$

- Úprava rovnic:

$$\frac{C_1}{F} - \frac{1}{\sum_{i=1}^{nK} \frac{1}{(H - R_s * \psi \cos \delta_i)^3}} = 0 \dots\dots\dots (254)$$

$$\frac{C_2}{M} - \frac{\cos \delta_i}{\sum_{i=1}^{nK} \frac{1}{(H - R_s * \psi \cos \delta_i)^3}} = 0 \dots\dots\dots (255)$$

**K = Find(H, ψ)**

- Výstup v bezrozměrném tvaru



$$K = \frac{H}{\psi} \dots\dots\dots (256)$$

K výstupním hodnotám se poté přiřadí příslušné jednotky:

Pomyslná tloušťka olejového filmu v ose ložiska	$H = 0,0459 \text{ mm}$
Sklon desky	$\psi = 5,9e-7 \text{ rad}$

Relativní posunutí v ose otáčení je dáno vztahem  $\varepsilon_{02} = \frac{H - h_0}{h_0} \dots\dots (241)$

Relativní posunutí v ose otáčení	$\varepsilon_{02} = -0,13$
----------------------------------	----------------------------

Min. tloušťka olejového filmu a relativní posunutí na obvodu ložiska se určí ze vztahů

$${}^{obv}h_i = H - R_{Li}\psi \cos \delta_{1i} \dots\dots (242), \quad {}^{obv}h_{\min} = \min({}^{obv}h_i) \dots\dots (243),$$

$${}^{obv}\varepsilon_M = \frac{{}^{obv}h_{\min} - h_0}{h_0} \dots\dots\dots (244)$$

Tloušťka olejového filmu na obvodě ložiska	${}^{obv}h_{\min} = 0,0255 \text{ mm}$
Relativní posunutí desky na obvodu ložiska	${}^{obv}\varepsilon_M = -0,15$
Vyhovuje dovolené hodnotě	$\varepsilon_{1D} = -0,4$

Tloušťka olejového filmu a tlak v komoře ložiska se stanoví pomocí vztahů :

$$h_i = H - R_{si}\psi \cos \delta_{1i} \dots\dots (245), \quad p_{Li} = \frac{12\eta Q_{01}}{k_{Q1} * h_i^3} \dots\dots\dots (246), \text{ max. tlak je následně}$$

$$p_M = \max(p_{Li}) \dots\dots\dots (247)$$

$$p_M = \max(p_{Li}) \dots\dots\dots (247).$$

Tlak čerpadla je stanoven ze vztahu  $p_c = \max(p_{01}, p_M, p_{cz}) + 1 \text{ MPa} (248)$  :

Max. tlak v komoře ložiska	$p_M = 3,5 \text{ MPa}$
Tlak čerpadla	$p_c = 7 \text{ MPa}$

Hydraulický výkon ložiska se stanoví ze vztahu  $P_{Hc} = Q_c * p_c \dots\dots\dots (249)$

Hydraulický výkon ložiska	$P_{Hc} = 0,1 \text{ kW}$
---------------------------	---------------------------

Třecí výkon se stanoví pro  $\varepsilon = \varepsilon_{01}$  ze vztahů

$$\omega = 2\pi n_1$$

$$M_T(\varepsilon) = \frac{\pi\eta\omega}{2h_0(1+\varepsilon)} \sum_{j=1}^m (R_{Lj}^4 - R_{L0j}^4 + R_{Bj}^4 - R_{Cj}^4) \dots\dots (250), \quad R_B = R_s - \frac{b}{2} \dots\dots (202),$$

$$R_C = R_s + \frac{b}{2} \dots\dots (203), \quad P_T = M_T(\varepsilon) * \omega \dots\dots\dots (251)$$

Třecí výkon ložiska	$P_T = 8,8 \text{ kW}$
---------------------	------------------------

**Př.: 11 - Hydrostatické ložisko desky svíslého soustruhu pro přenos axiální síly a momentu s regulací Q = konst.)**

Dáno:

Jmenovitý poloměr ložiska	$R_L = 1750 \text{ mm}$
Poměr šířky ložiska k průměru	$k_B = 0,05$
Poměr šířky komory k šířce ložiska	$k_b = 0,6$
Počet komor na vodící dráze	$n_K = 8$
Počet drah ložiska	$n_D = 1$
Obr. 29 – Rozměry hydrostatického ložiska	

Zatížení ložiska:	
• Tíha stolu – předpětí ložiska	$F_0 = 100 \text{ kN}$
• Tíha obrobku	$F_Q = 600 \text{ kN}$
• Vyložení těžiště obrobku od osy rotace	$a_F = 10 \text{ mm}$
• Otáčky desky při zatížení $F_0, F_Q$	$n1 = 20 \text{ min}^{-1}$
• Otáčky desky při zatížení $F_0$ (lehké obrobky)	$n2 = 80 \text{ min}^{-1}$
• Ustálená teplota při $n2 = 80 \text{ min}^{-1}$	$t_2 = 60^\circ\text{C}$
Kinematická viskozita oleje (ISO HV46/40°C)	$\nu_{t1} = 4,6 * 10^{-5} \text{ m}^2 * \text{s}^{-1}$
Kinematická viskozita oleje (ISO HV46/60°C)	$\nu_{t2} = 2,04 * 10^{-5} \text{ m}^2 * \text{s}^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,87 * 10^3 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_0$ při teplotě $t_1 = 40^\circ\text{C}$	$h_{0t1} = 0,3 \text{ mm}$
Přípustný rozsah relativního posunutí desky ložiska od počáteční polohy ( $h_{0t}$ )	$\varepsilon \in \langle \varepsilon_{1D}, \varepsilon_{2D} \rangle, \varepsilon_{1D} = -0,5, \varepsilon_{2D} = 0,5$

Stanovit:

- Rozměry ložiska
- Tlakové předpětí v komoře ložiska  $p_0$
- Proud segmentem ložiska  $Q_0$  a ložiskem  $Q_c$
- Tloušťka olejového filmu  $h_{0t}$  při ustálené teplotě  $t_{n2}$
- Tloušťka olejového filmu na obvodě ložiska  $^{obv}h_{\min}$
- Relativní posunutí desky v ose  $\varepsilon_{0I}$  při centrickém zatížení
- Sklon desky  $\psi$  a relativní posunutí desky na obvodu ložiska  $^{obv}\varepsilon_M$
- Max. tlak  $p_M$  v komoře ložiska
- Tlak čerpadla  $p_c$
- Výkon čerpadla  $P_{Hc}$
- Třecí výkon ložiska  $P_T$

Z Tab. 2 – Součinitelé únosnosti a průtoku [ 8] se stanoví pro dané  $k_B = 0,05, n_K = 8$  součinitelé průtoku a únosnosti:

Součinitel únosnosti	$k_F = 0,796$
Součinitel průtoku	$k_Q = 70,73$

Pomocí vztahů  $R_{L0j} = R_{Lj}(1 - 2k_{Bj}) \dots \dots \dots (215), R_{sj} = R_{Lj}(1 - k_{Bj}) \dots \dots \dots (216),$

$B_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} \dots \dots \dots (217), b_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} * k_{bj} \dots \dots \dots (218)$  se stanoví:

$R_{L0} = 1575 \text{ mm}$
$R_s = 1662,5 \text{ mm}$
$B = 175 \text{ mm}$
$b = 105 \text{ mm}$

Dále ze vztahů  $\alpha_j = \frac{2\pi}{n_{Kj}} \dots \dots (211), A_j = \frac{\alpha_j}{2} (R_{Lj}^2 - R_{L0j}^2) \dots \dots (223),$

$A_{cj} = A_j * n_{Kj} \dots \dots \dots :$

Úhel segmentu ložiska	$\alpha = 45^\circ$
Plocha segmentu ložiska	$A = 0,2285 \text{ m}^2$
Celková plocha ložiska	$A_c = 1,828 \text{ m}^2$

Počáteční podmínky provozu ložiska jsou dány vztahy:

$$p_0 = \frac{F_0}{\sum_{j=1}^{nD} A_j * k_{Fj}} \dots\dots\dots (228), G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots\dots\dots (21), Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q \dots\dots\dots (24),$$

$$Q_c = p_0 * G_0 \sum_{j=1}^{nD} k_{Qj} * n_{Kj} \dots\dots\dots (229)$$

Počáteční tlak v komoře	$p_0 = 0,07$ MPa
Proud segmentem ložiska	$Q_0 = 16,4$ l/min
Celkový proud ložiska	$Q_c = 131,2$ l/min

Tlak v komoře při zvedání ložiska se určí pomocí vztahů:

$$\alpha_{komj} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} \frac{B_j - b_j}{R_{sj}} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} - 2k_{Bj} \frac{1 - k_{Bj}}{1 + k_{bj}} \dots\dots\dots (222), A_{kj} = R_{sj} * \alpha_{komj} * b_j \dots\dots\dots (225),$$

$$A_{kcj} = A_{kj} * n_{Kj} \dots\dots\dots (226), p_{cz} = \frac{F}{\sum_{j=1}^{nD} A_{kcj}} \dots\dots\dots (232)$$

Tlak v komoře při zvedání	$p_{cz} = 0,67$ Mpa
---------------------------	---------------------

Tlak a poměrné posunutí při centrickém zatížení se určí:

$$F = F_0 + F_Q \dots\dots\dots (230)$$

$$p_{01} = \frac{F}{\sum_{j=1}^{nD} A_{cj} * k_{Fj}} \dots\dots\dots (233), \epsilon_{01} = \left( \frac{p_0}{p_{01}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \dots\dots\dots (234)$$

Celková axiální síla	$F = 700$ kN
Tlak při centrickém zatížení	$p_{01} = 0,48$ Mpa
Poměrné posunutí desky při centrickém zatížení	$\epsilon_{01} = -0,48$

Tloušťka olejového filmu  $h_{0t2}$  při ustálené teplotě  $t_2 = 60^\circ\text{C}$  se stanoví pomocí vztahu

$$\frac{h_{t2}^3}{h_{t1}^3} = \frac{v_{t2}}{v_{t1}} \dots\dots\dots (57) \text{ pro dané veličiny } h_{0t1}, v_{t1}, v_{t2}:$$

Tloušťka olej. filmu při ustálené teplotě $t_2 = 60^\circ\text{C}$	$h_{0t2} = 0,228$ mm
--	----------------------

Dynamická viskozita při ustálené teplotě  $t_2 = 60^\circ\text{C}$  je dána vztahem  $\eta = \rho * \nu \dots\dots\dots (3)$

Dynamická viskozita při $t_2 = 60^\circ\text{C}$	$\eta_{t2} = 0,0177$ Pa.s
--	---------------------------

Pro excentrické zatížení ( $M > 0, F > 0$ ) se stanoví pomyslná tloušťka olejového filmu v ose ložiska  $H$  a sklon desky  $\psi$  pomocí vztahů  $M = F_Q * a_F \dots\dots\dots (231)$ , dále pro  $\eta = \eta_{t2}$ :

$$F = \frac{12\eta * Q_0 * A * k_F}{k_Q} \sum_{i=1}^{nK} \frac{1}{(H - R_s \psi \cos \delta_i)^3} = f(H, \psi) \dots\dots\dots (235),$$

$$M = R_s \frac{12\eta * Q_0 * A * k_F}{k_Q} \sum_{i=1}^{nK} \frac{\cos \delta_i}{(H - R_s \psi \cos \delta_i)^3} = g(H, \psi) \dots\dots\dots (236) \quad \delta_{ji} = \frac{\alpha_j}{2} + (i-1)\alpha_j$$

$\dots\dots\dots (227)$ .

Pro řešení nelineárních algebraických rovnic pro neznámé  $H$  a  $\psi$  se použije procedura programu [ 3 ] takto:

- Počáteční podmínky a parametry zatížení upravené do bezrozměrného tvaru:

**Given**

$$H = h_0, \psi = 0$$

$$C_1 = \frac{12\eta * Q_0 * A * k_F}{k_Q} \dots (252), C_2 = R_s * C_1 \dots (253)$$

- Úprava rovnic:

$$\frac{C_1}{F} - \frac{1}{\sum_{i=1}^{nK} \frac{1}{(H - R_s * \psi \cos \delta_i)^3}} = 0 \dots (254), \frac{C_2}{M} - \frac{\cos \delta_i}{\sum_{i=1}^{nK} \frac{1}{(H - R_s * \psi \cos \delta_i)^3}} = 0 \dots (255)$$

**K = Find(H,  $\psi$ )**

- Výstup v bezrozměrném tvaru

$$K = \begin{matrix} H \\ \psi \end{matrix} \dots (256)$$

K výstupním hodnotám se dále přiřadí příslušné jednotky:

Pomyslná tloušťka olejového filmu v ose ložiska	$H = 0,1196 \text{ mm}$
Sklon desky	$\psi = 2,5e-7 \text{ rad}$

Min. tloušťka olejového filmu a relativní posunutí na obvodu ložiska se určí ze vztahů

$${}^{obv}h_i = H - R_{L1}\psi \cos \delta_{1i} \dots (242), {}^{obv}h_{\min} = \min({}^{obv}h_i) \dots (243),$$

$${}^{obv}\epsilon_M = \frac{{}^{obv}h_{\min} - h_0}{h_0} \dots (244)$$

Tloušťka olejového filmu na obvodě ložiska	${}^{obv}h_{\min} = 0,119 \text{ mm}$
Relativní posunutí desky na obvodu ložiska	${}^{obv}\epsilon_M = -0,48$
Vyhovuje	$\epsilon_{1D} = -0,5$

Tloušťka olejového filmu a tlak v komoře ložiska se stanoví pro  $\eta = \eta_{t2}$  pomocí vztahů:

$$h_i = H - R_{s1}\psi \cos \delta_{1i} \dots (245), p_{L1i} = \frac{12\eta Q_{01}}{k_{Q1} * h_i^3} \dots (246), \text{max. tlak je poté}$$

$$p_M = \max(p_{L1i}) \quad p_M = \max(p_{L1i}) \dots (247) \dots (247).$$

Tlak čerpadla se stanoví ze vztahu:  $p_c = \max(p_{01}, p_M, p_{cz}) + 1 \text{ MPa} \dots (248)$ :

Max. tlak v komoře ložiska	$p_M = 0,67 \text{ MPa}$
Tlak čerpadla	$p_c = 2 \text{ MPa}$

Hydraulický výkon ložiska se stanoví ze vztahu  $P_{Hc} = Q_c * p_c \dots (249)$

Hydraulický výkon ložiska	$P_{Hc} = 4,4 \text{ kW}$
---------------------------	---------------------------

Třecí výkon se stanoví pro  $\eta = \eta_{t2}, n = n_2, \epsilon = 0$  ze vztahů

$$\omega = 2\pi n$$

$$M_T(\varepsilon) = \frac{\pi\eta\omega}{2h_0(1+\varepsilon)} \sum_{j=1}^m (R_{Lj}^4 - R_{L0j}^4 + R_{Bj}^4 - R_{Cj}^4) \dots\dots\dots (250), R_B = R_s - \frac{b}{2} \dots\dots (202)$$

$$R_C = R_s + \frac{b}{2} \quad R_C = R_s + \frac{b}{2} \dots\dots\dots (203) \dots\dots (203), P_T = M_T(\varepsilon) * \omega \dots\dots (251) \quad P_T = M_T(\varepsilon) * \omega \dots\dots (251)$$

Třecí výkon ložiska	$P_T = 44,1 \text{ kW}$
---------------------	-------------------------

Provoz při ustálené teplotě oleje bude podmíněn užitím chladničky.

**Př.: 12 – Čtyřdráhové hydrostatické ložisko otočného stolu pro přenos axiální síly a momentu s regulací Q = konst.)**

Dáno:

Dráha 1:			
• Jmenovitý poloměr dráhy		$R_{L1} = 980 \text{ mm}$	
• Poměr šířky dráhy k průměru		$k_{B1} = 0,054$	
• Poměr šířky komory k šířce ložiska		$k_{b1} = 0,15$	
• Počet komor		$n_{K1} = 8$	
Dráha 2:			
• Jmenovitý poloměr dráhy		$R_{L2} = 825 \text{ mm}$	
• Poměr šířky dráhy k průměru		$k_{B2} = 0,052$	
• Poměr šířky komory k šířce ložiska		$k_{b2} = 0,19$	
• Počet komor		$n_{K2} = 8$	
Dráha 3:			
• Jmenovitý poloměr dráhy		$R_{L3} = 474 \text{ mm}$	
• Poměr šířky dráhy k průměru		$k_{B3} = 0,09$	
• Poměr šířky komory k šířce ložiska		$k_{b3} = 0,18$	
• Počet komor		$n_{K3} = 4$	
Dráha 4:			
• Jmenovitý poloměr dráhy		$R_{L4} = 237 \text{ mm}$	
• Poměr šířky dráhy k průměru		$k_{B4} = 0,11$	
• Poměr šířky komory k šířce ložiska		$k_{b4} = 0,3$	
• Počet komor		$n_{K4} = 1$	
Počet drah ložiska		$n_D = 4$	
Obr. 30 – Hydrostatické ložisko otočného stolu			
Zatížení ložiska:			
• Tíha stolu – předpětí ložiska		$F_0 = 190 \text{ kN}$	
• Max. tíha obrobku		$F_Q = 400 \text{ kN}$	
• Zatěžovací stavy:			
Zatěžovací stav	1	2	3
Vyložení těžiště obrobku od osy rotace	$a_{F1} = 0,3R_{L1} = 294 \text{ mm}$	$a_{F2} = R_{L1} = 980 \text{ mm}$	$a_{F3} = 0$
Tíha obrobku	$F_{Q1} = F_Q = 400 \text{ kN}$	$F_{Q2} = 0,3F_Q = 120 \text{ kN}$	$F_{Q3} = F_Q = 400 \text{ kN}$
Otáčky desky při zatížení	$n_1 = 2,5 \text{ min}^{-1}$		
Ustálená teplota při $n_1 = 2,5 \text{ min}^{-1}$	$t_n = 40^\circ\text{C}$		

Kinematická viskozita oleje (ISO HV46/40°C)	$\nu = 4,6 * 10^{-5} m^2 * s^{-1}$
Měrná hmotnost oleje	$\rho = 0,87 * 10^3 kg * m^{-3}$
Počáteční tloušťka olejového filmu při zatížení ložiska silou $F_0$	$h_0 = 0,03 mm$
Přípustný rozsah relativního posunutí desky ložiska od počáteční polohy ( $h_0$ )	$\varepsilon \in \langle \varepsilon_{1D}, \varepsilon_{2D} \rangle, \varepsilon_{1D} = -0,4, \varepsilon_{2D} = 0,4$

Stanovit:

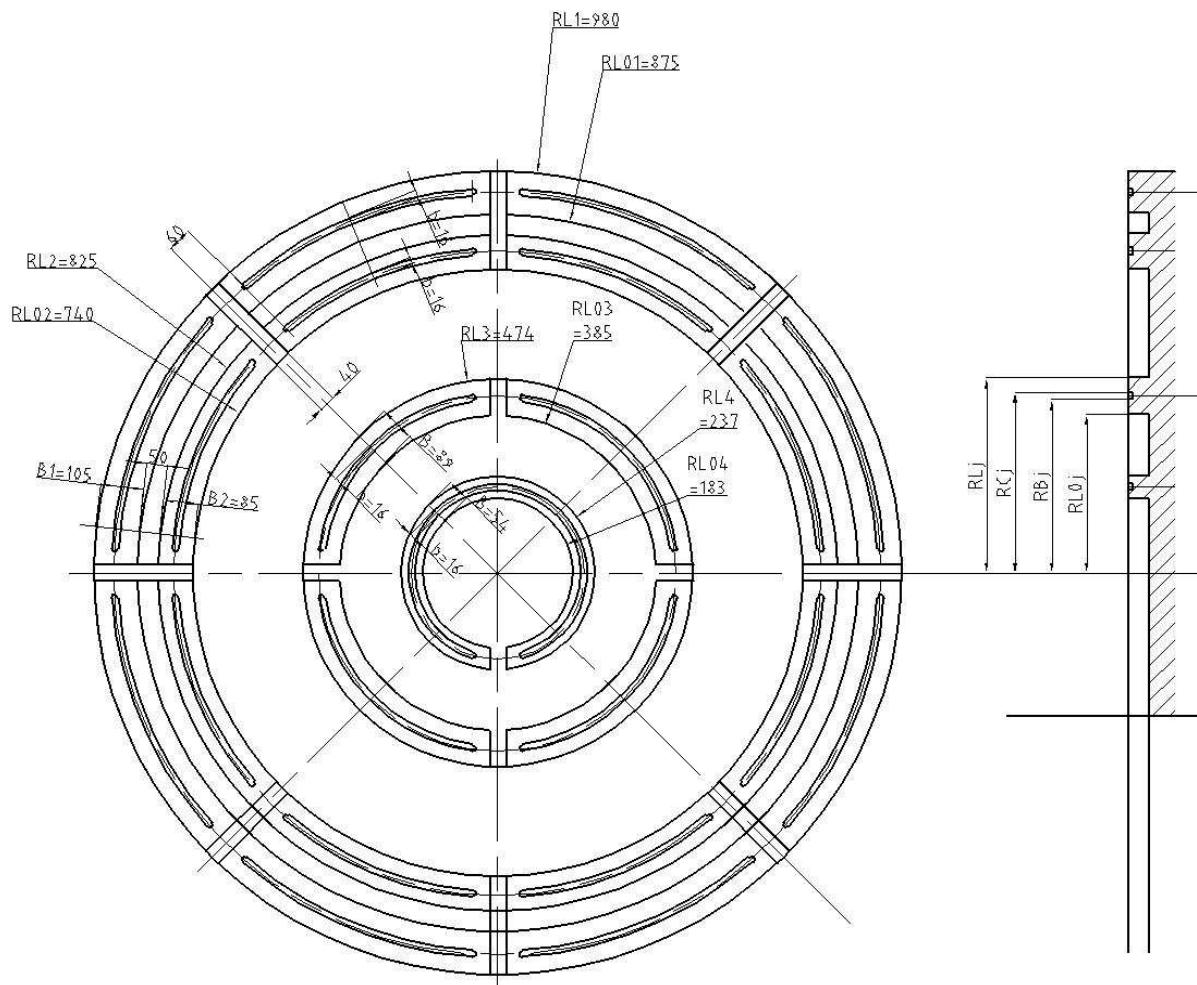
- Tlakové předpětí v komoře ložiska  $p_0$
- Proud segmentem ložiska  $Q_0$  a ložiskem  $Q_c$
- Relativní posunutí desky v ose při excentrickém zatížení  $\varepsilon_{02}$
- Sklon desky  $\psi$ , tloušťka olejového filmu na obvodě ložiska <sup>obv</sup>  $h_{min}$  a relativní posunutí desky na obvodu ložiska <sup>obv</sup>  $\varepsilon_M$
- Max. tlak v komoře ložiska  $p_M$
- Tlak čerpadla  $p_c$
- Výkon čerpadla  $P_{Hc}$
- Třecí výkon ložiska  $P_T$

Součinitelé únosnosti dráhy ložiska a průtoku segmentem dráhy ložiska pro  $j = 1 \dots 4$  se

$$k_{Fj} = \frac{1 - k_{bj}}{8(1 - k_{Bj})} \left[ \frac{2 - k_{Bj}(1 - k_{bj})}{\ln \frac{1}{1 - k_{Bj}(1 - k_{bj})}} - \frac{2 - k_{Bj}(3 + k_{bj})}{\ln \frac{1 - k_{Bj}(1 + k_{bj})}{1 - 2k_{Bj}}} \right] \dots (219),$$

stanoví ze vztahů

$$k_{Qj} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} \left[ \frac{1}{\ln \frac{1}{1 - k_{Bj}(1 - k_{bj})}} + \frac{1}{\ln \frac{1 - k_{Bj}(1 + k_{bj})}{1 - 2k_{Bj}}} \right] \dots (220)$$



**Obr. 30 – Hydrostatické ložisko otočného stolu**

Součinitel únosnosti	$k_F = 0,58$	0,59	0,59	0,65
Součinitel průtoku	$k_Q = 32,7$	35,6	37	138,7

Dále ze vztahů  $\alpha_j = \frac{2\pi}{n_{Kj}} \dots (221)$ ,  $A_j = \frac{\alpha_j}{2} (R_{Lj}^2 - R_{L0j}^2) \dots (223)$ ,  $A_{cj} = A_j * n_{Kj}$   
 ..... (224) pro jednotlivá ložiska:

Úhel segmentu drah ložiska	$\alpha = 45$	45	90	$360^\circ$
Plocha segmentu drah ložiska	$A = 0,076$	0,052	0,06	$0,07 \text{ m}^2$
Celková plocha drah ložiska	$A_c = 0,61$	0,42	0,24	$0,07 \text{ m}^2$

Výrazy pro jednotlivé komory ložisek jsou

$$\alpha_{komj} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} - \frac{B_j - b_j}{R_{sj}} = \frac{2\pi}{n_{Kj}} - 2k_{Bj} \frac{1 - k_{bj}}{1 + k_{bj}} \dots (222), \quad A_{kj} = R_{sj} * \alpha_{komj} * b_j \dots (225),$$

$$A_{kcj} = A_{kj} * n_{Kj} \dots (226):$$

Úhel komory drah ložiska pro $j = 1 \dots n_D$	$\alpha_{kom} = 39,5$	39,9	80,3	$349,6^\circ$
Plocha komory drah ložiska pro $j = 1 \dots n_D$	$A_k = 0,01$	0,009	0,009	$0,02 \text{ m}^2$

Celková plocha komor drah ložiska pro $j = 1 \dots n_D$	$A_{kc} = 0,08 \quad 0,07 \quad 0,04 \quad 0,02 \text{ m}^2$
---	--

Poloha komor  $j$ -té dráhy ložiska je dána vztahem  $\delta_{ji} = \frac{\alpha_j}{2} + (i-1)\alpha_j \dots (227)$ :

$$\delta_1^T = (22.5 \quad 67.5 \quad 112.5 \quad 157.5 \quad 202.5 \quad 247.5 \quad 292.5 \quad 337.5) \cdot \text{deg}$$

$$\delta_2^T = (22.5 \quad 67.5 \quad 112.5 \quad 157.5 \quad 202.5 \quad 247.5 \quad 292.5 \quad 337.5) \cdot \text{deg}$$

$$\delta_3^T = (45 \quad 135 \quad 225 \quad 315) \cdot \text{deg}$$

$$\delta_{4_i} := 0$$

Počáteční podmínky ložiska jsou určeny vztahy  $p_0 = \frac{F_0}{\sum_{j=1}^{n_D} A_j * k_{Fj}} \dots (228)$ ,

$$G_0 = \frac{h_0^3}{12\eta} \dots (21), \quad Q_0 = p_0 * G_0 * k_Q \dots (24),$$

$$Q_c = p_0 * G_0 \sum_{j=1}^{n_D} k_{Qj} * n_{kj} \dots (229):$$

Počáteční tlak v komorách	$p_0 = 0,24 \text{ MPa}$
Průtok segmentem dráhy 1	$Q_{01} = 0,02 \text{ l/min}$
Celkový průtok dráhou 1	$Q_{c1} = 0,14 \text{ l/min}$
Průtok segmentem dráhy 2	$Q_{02} = 0,02 \text{ l/min}$
Celkový průtok dráhou 1	$Q_{c2} = 0,16 \text{ l/min}$
Průtok segmentem dráhy 3	$Q_{03} = 0,02 \text{ l/min}$
Celkový průtok dráhou 3	$Q_{c3} = 0,08 \text{ l/min}$
Průtok segmentem dráhy 4	$Q_{04} = 0,08 \text{ l/min}$
Celkový průtok dráhou 4	$Q_{c4} = 0,08 \text{ l/min}$
Celkový průtok ložiskem	$Q_c = 0,45 \text{ l/min}$

Tlak v ložisku při zvedání desky z dosedu je dán vztahem  $p_{cz} = \frac{F}{\sum_{j=1}^{n_D} A_{kcj}} \dots (232)$ ,

pro max. zatížení  $F = F_{Q1} + F_0$ :

Tlak v ložisku při zvedání	$p_{cz} = 2,8 \text{ MPa}$
----------------------------	----------------------------

Pro řešení nelineárních algebraických rovnic pro neznámé  $H$  a  $\psi$  jedné dráhy ložiska se použije procedura programu [ 3 ] takto:

- Počáteční podmínky v bezrozměrném tvaru:

**Given**

$$H = h_0, \quad \psi = 0$$

Konstanty upravené do bezrozměrného tvaru se odvodí ze vztahů.  $C1_j = \frac{12\eta * Q_{0j} * A_j * k_{Fj}}{k_{Qj}}$

$\dots (238)$ ,  $C2_j = R_{sj} * C1_j \dots (240)$  pro  $j = 1 \dots 4$ :

$C1 =$	$2,87e - 10$
	$2,02e - 10$
	$2,3e - 10$
	$3e - 10$



$2,66e - 10$
$C2 = 1,58e - 10$
$9,89e - 11$
$0$

Pozn.: Konstanta  $C2_4 = 0$  protože dráha 4 nepřenáší klopný moment.

- Nelineární rovnice dle

$$F - \left[ C1_1 \sum_{i=1}^{nK1} \frac{1}{(H - R_{s1} \psi \cos \delta_{1i})^3} + \dots + C1_j \sum_{i=1}^{nKj} \frac{1}{(H - R_{sj} \psi \cos \delta_{ji})^3} + \dots \right] = 0 \dots (237),$$

$$M - \left[ C2_1 \sum_{i=1}^{nK1} \frac{\cos \delta_{1i}}{(H - R_{s1} \psi \cos \delta_{1i})^3} + \dots + C2_j \sum_{i=1}^{nKj} \frac{\cos \delta_{ji}}{(H - R_{sj} \psi \cos \delta_{ji})^3} \right] = 0 \dots (239)$$

Excentrické zatížení ložiska je určeno dvěma stavby dle zadání.

$K = Find(H, \psi)$

- Výstup v bezrozměrném tvaru dle

$$K = \frac{H}{\psi} \dots (256).$$

K výstupním hodnotám se poté přiřadí příslušné jednotky.

Poměrné posunutí v ose ložiska je dáno vztahem  $\varepsilon_{02} = \frac{H - h_0}{h_0} \dots (241)$ , tloušťka

olejového filmu na obvodu největší dráhy  $^{obv}h_i = H - R_{L1} \psi \cos \delta_{1i} \dots (242)$ , min. hodnota

$^{obv}h_{\min} = \min(^{obv}h_i) \dots (243)$ , max. poměrná hodnota

$^{obv}\varepsilon_M = \frac{^{obv}h_{\min} - h_0}{h_0} \dots (244)$ , tlak v komoře největší dráhy a max. hodnota

$$p_{L1i} = \frac{12\eta Q_{01}}{k_{Q1} * h_i^3} \dots (246),$$

$p_M = \max(p_{L1i}) \dots (247)$ , tlak čerpadla

$p_c = \max(p_{01}, p_M, p_{cz}) + 1MPa \dots (248)$ , hydraulický výkon

$P_{Hc} = Q_c * p_c \dots (249)$ . Pro  $F = F_M, a_F = 0$  se stanoví

$$p_{01} = \frac{F}{\sum_{j=1}^{nD} A_{cj} * k_{Fj}} \dots (233).$$

Třecí výkon se stanoví pro  $\varepsilon = \varepsilon_{02}$  ze vztahů

$$\omega = 2\pi n_1$$

$P_T = M_T(\varepsilon) * \omega \dots (251)$  pro rozměry jednotlivých drah ložiska  $R_{sj} = R_{Lj}(1 - k_{Bj}) \dots$

(216),  $B_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} \dots (217)$ ,  $b_j = 2R_{Lj} * k_{Bj} * k_{bj} \dots (218)$  a třecí moment

$$M_T(\varepsilon) = \frac{\pi\eta\omega}{2h_0(1 + \varepsilon)} \sum_{j=1}^m (R_{Lj}^4 - R_{L0j}^4 + R_{Bj}^4 - R_{Cj}^4) \dots (250)$$

$$M_T(\varepsilon) = \frac{\pi\eta\omega}{2h_0(1 + \varepsilon)} \sum_{j=1}^m (R_{Lj}^4 - R_{L0j}^4 + R_{Bj}^4 - R_{Cj}^4) \dots (250).$$

Výsledky jsou zpracovány pro uvedené zatěžovací stavy tak, aby bylo možné porovnat jednotlivé veličiny.

Zatěžovací stav	1	2	3
Vyložení těžiště obrobku od osy rotace	$a_{F1} = 0,3R_{L1} = 294$ mm	$a_{F2} = R_{L1} = 980$ mm	$a_{F3} = 0$
Tíha obrobku	$F_{Q1} = F_Q = 400$ kN	$F_{Q2} = 0,3F_Q = 120$ kN	$F_{Q3} = F_Q = 400$ kN
Klopný moment	$M = 117,6$ kNm	$M = 117,6$ kNm	$M = 0$
Otáčky desky při zatížení	$n_l = 2,5 \text{ min}^{-1}$		
Ustálená teplota při $n_l = 2,5 \text{ min}^{-1}$	$t_n = 40^\circ\text{C}$		

Pomyslná tloušťka olejového filmu v ose ložiska $H$	mm	0,0212	0,0288	0,0255
Sklon desky $\psi$	rad	4,567e-6	12e-6	0
Poměrné posunutí v ose ložiska $\epsilon_{01}$ při centrickém zatížení	-	-	-	-0,3
Poměrné posunutí v ose ložiska $\epsilon_{02}$ při excentrickém zatížení	-	-0,3	-0,041	-
Min. hodnota tloušťky olejového filmu na obvodu největší dráhy $^{obv}h_{\min}$	mm	0,017	0,018	0,0255
Max. poměrná hodnota tloušťky olejového filmu na obvodu $^{obv}\epsilon_M$	-	-0,43	-0,38	-0,3
Max.tlak v komoře největší dráhy $p_M$	MPa	1,26	1,03	0,75
Tlak čerpadla $p_c$	MPa	4		
Hydraulický výkon $P_{Hc}$	kW	0,03		
Třecí výkon $P_T$	kW	0,13	0,1	0,13

Z výsledků vyplývá, že hodnota sklonu  $\psi$  při daném klopném momentu  $M$  je zřejmě ovlivněna velikostí působící síly – je to dáno nelineární charakteristikou ložiska.

## SEZNAMY

### Seznam tabulek

Tab. 1 - Optimální šířka komory [ 9] .....	22
Tab. 2 – Součinitelé únosnosti a průtoku [ 8] .....	65

### Seznam příkladů

Př.: 1 - Charakteristika hydrostatického rovinného ložiska s regulací $G_R = \text{konst.}$ .....	14
Př.: 2 - Charakteristika hydrostatického rovinného ložiska s regulací $Q = \text{konst.}$ .....	19
Př.: 3 - Optimalizace rovinného ložiska pro přímočaré vedení.....	25
Př.: 4 - Zatížení rovinného hydrostatického ložiska.....	26
Př.: 5 - Charakteristika hydrostatického rovinného ložiska kruhového tvaru s regulací $G_R = \text{konst.}$ .....	33
Př.: 6 - Hydrostatické přímočaré vedení s regulací kapilárami ( $G_R = \text{konst.}$ ) - zatížení v režimu 1. hrubování.....	47
Př.: 7 - Hydrostatické přímočaré vedení s regulací kapilárami ( $G_R = \text{konst.}$ ) – zatížení v režimu dokončování .....	50
Př.: 8 - Hydrostatické přímočaré vedení s regulací prvkem s konstantním proudem ( $Q = \text{konst.}$ ) - zatížení v režimu 1. hrubování.....	56
Př.: 9 - Hydrostatické ložisko kruhového pohybu s regulací kapilárami ( $G_R = \text{konst.}$ ).....	60
Př.: 10 - Hydrostatické ložisko manipulátoru pro přenos axiální síly a momentu s regulací $Q = \text{konst.}$ ).....	70
Př.: 11 - Hydrostatické ložisko desky svíslého soustruhu pro přenos axiální síly a momentu s regulací $Q = \text{konst.}$ ) .....	73
Př.: 12 – Čtyřdráhové hydrostatické ložisko otočného stolu pro přenos axiální síly a momentu s regulací $Q = \text{konst.}$ ) .....	77

### Seznam obrázků

Obr. 1 - Průtok mezerou .....	5
Obr. 2 - Hydrostatické ložisko rovinné .....	7
Obr. 3 - Posunutí tělesa v ložisku.....	9
Obr. 4 - Tlaková charakteristika ložiska s regulací $G_R = \text{konst.}$ .....	10
Obr. 5 – Kapilára .....	11
Obr. 6 - Silová charakteristika ložiska s regulací $G_R = \text{konst.}$ .....	12
Obr. 7 - Proudová charakteristika ložiska s regulací $G_R = \text{konst.}$ .....	13
Obr. 8 - Tlaková charakteristika ložiska s regulací $Q = \text{konst.}$ .....	18
Obr. 9 - Silová charakteristika ložiska s regulací $Q = \text{konst.}$ .....	18
Obr. 10 - Hydrostatické vedení saní otočného stolu [ 5].....	23
Obr. 11- Hydrostatické ložisko rovinné-optimalizace rozměrů .....	24
Obr. 12 - Těsnění rovinného hydrostatického ložiska.....	25
Obr. 13 - Ložiska se společnou drenážní drážkou.....	29
Obr. 14 - Hydrostatické ložisko kruhového tvaru s těsněním .....	30
Obr. 15 - Ztrátový výkon ložiska v závislosti na $\rho_L = \frac{R_L}{R_{L1}}$ .....	32
Obr. 16 – Zatížení vedení .....	35
Obr. 17 – Hydrostatické vedení se vzájemně předepnutými ložisky – rozměry, zatížení .....	40

Obr. 18 – Hydrostatické vedení se vzájemně předepnutými ložisky – rozložení sil působících na vedení .....	41
Obr. 19 – Reakce ložisek 1-2 v závislosti na posunutí ( $\epsilon_1=-0,5$ , $\epsilon_2=+0,5$ ) .....	42
Obr. 20 - Reakce ložisek 3-4 v závislosti na posunutí ( $\epsilon_1=-0,5$ , $\epsilon_2=+0,5$ ) .....	43
Obr. 21 – Proud dvojice ložisek 1-2 a 3-4 .....	45
Obr. 22 – Hydraulický výkon ložisek 1-2 a 3-4 .....	46
Obr. 23 – Proud hydrostatického vedení .....	46
Obr. 24 – Hydraulický výkon vedení .....	46
Obr. 25 – Zatížení dvojice ložisek 1-2 při režimu dokončování .....	51
Obr. 26 - Reakce ložisek 1-2 v závislosti na posunutí ( $\epsilon_1=-0,5$ , $\epsilon_2=+0,5$ ) pro $Q = \text{konst.}$ .....	53
Obr. 27 – Axiální ložisko předepnuté. ....	58
Obr. 28 – Hydrostatické ložisko rovinné zatížené axiální silou a klopným momentem.....	64
Obr. 29 – Rozměry hydrostatického ložiska .....	66
Obr. 30 – Hydrostatické ložisko otočného stolu .....	79

## Seznam použité literatury

### Firemní literatura (katalogy, www.)

- [ 1] BUSAK + SHAMBAN. [cit.2013-08-12]. Dostupné z: [http:// www.tss.trelleborg.com](http://www.tss.trelleborg.com)
- [ 2] HENNIG SLIDEWAY WIPER SYSTEMS. [cit.2013-08-12]. Dostupné z: <http://www.hennig>
- [ 3] <http://www.dtn.mathsoft.cz/>
- [ 4] REXROTH. [cit.2013-08-12]. Dostupné z: [http:// www.boschrexroth.com](http://www.boschrexroth.com)
- [ 5] ŠKODA MACHINE TOOL. [cit.2013-08-12]. Dostupné z: <http://www.cz-smt.cz/>

### Publikace

- [ 6] BRENÍK, P., PÍČ, J. Obráběcí stroje, Konstrukce a výpočty. Praha: SNTL, 1982.
- [ 7] HUDEC, Z. Uložení vřetene – příklady. Plzeň: ZČU, 2013. ISBN 978-90-261-0390
- [ 8] JANEČEK, O. Statické a dynamické charakteristiky hydrostatického ložiska velkého průměru. Strojírnoství, 1987, č. 9.
- [ 9] VANĚK, S. Moderní výpočetní a zkušební metody v oboru obráběcích strojů. Konference. Liblice, 1983.

### Přílohy

- [10] PROGRAM MATHCAD. Soubor: hyve\_r21\_navrh.xml. Plzeň: ZČU 2014
- [ 11] PROGRAM MATHCAD. Soubor: hyve\_q21\_navrh.xml. Plzeň: ZČU 2014
- [12] PROGRAM MATHCAD. Soubor: hyve\_r21\_unos.xml. Plzeň: ZČU 2014
- [13] PROGRAM MATHCAD. Soubor: hyve\_q21\_unos.xml. Plzeň: ZČU 2014
- [14] PROGRAM MATHCAD. Soubor: hyve\_zatizeni.xml. Plzeň: ZČU 2014



## **KKS/KVS,KOS VEDENÍ HYDROSTATICKÁ - PŘÍKLADY**

doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.

Vydavatel:                   Západočeská univerzita v Plzni, Vydavatelství  
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň  
tel.: 377 631 951  
e-mail: [vydavatel@vyd.zcu.cz](mailto:vydavatel@vyd.zcu.cz)

Katedra:                   konstruování strojů  
Vedoucí katedry:       doc. Ing. Václava Lašová, CSc.  
Určeno:                   pro studenty FST  
Vyšlo:                   červen 2013  
Počet stran:             85  
Nositelé  
autorských práv:       doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.  
Západočeská univerzita v Plzni  
Vydání:                   1. vydání, on-line

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou



INVESTICE  
DO ROZVOJE  
VZDĚLÁVÁNÍ

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.

,

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky v rámci projektu č. CZ.1.07/2.2.00/07.0235 „Inovace výuky v oboru konstruování strojů včetně jeho teoretické, metodické a počítačové podpory“.