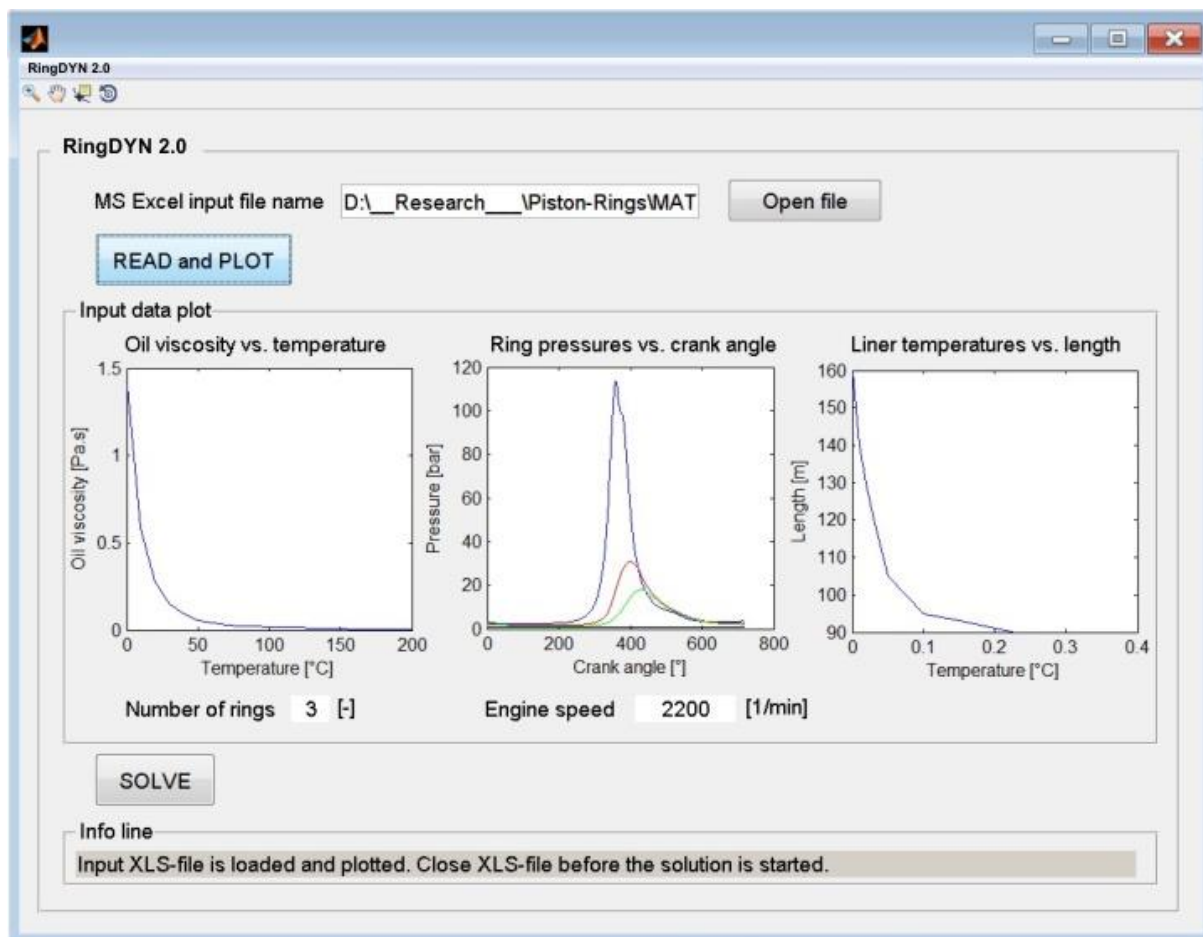


Název software v originále

RingDyn 2.0



Obrázek 1 Globální uživatelské prostředí software RingDyn

Autoři

Doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

Datum předání

1. 4. 2016

Interní označení

RingDyn2.0

Popis česky

RingDyn in version 2.0 is a software tool for solving dynamics and thermo-elastic-hydrodynamics sets of piston rings. The software includes the ability to solve one of up to four piston rings in mixed lubrication conditions. Dynamics uses Alfa-method (HHT) numerical integration of the equations of motion. The pressure in the oil layer is based on solving Reynolds equation by using the finite difference method with consideration of the influence of pressure, temperature and shear stresses on the viscosity and density of oil, the elastic deformation of the pin and pans, by unevenness on the oil flow and contact bumps. Individual rings during the numerical solution of input parameters affecting other rings. The software includes a user interface that loads the input text file.

Popis česky

RingDyn ve verzi 2.0 je softwarový nástroj pro řešení dynamiky a termo-elasto-hydrodynamiky sad pístních kroužků. Software zahrnuje možnost řešení jednoho až čtyř pístních kroužků v podmínkách smíšeného mazání. Dynamika využívá Alfa-metodu (HHT) numerické integrace pohybových rovnic. Tlak v olejové vrstvě vychází z řešení Reynoldsovi rovnice pomocí metody konečných diferencí s uvažováním vlivu tlaku, teploty a smykových napětí na viskozitu a hustotu oleje, elastických deformací čepu a pánve, vlivu nerovností na proudění oleje a kontaktů nerovností. Jednotlivé kroužky v průběhu numerického řešení ovlivňují vstupní parametry ostatních kroužků. Software obsahuje uživatelské prostředí načítající vstupní textový soubor.

Keywords

Piston ring, dynamics ring piston, viscosity, temperature distribution, Newton's method

Klíčová slova česky

Pístní kroužek, dynamika kroužku, píst, viskozita, rozložení teplot, Newtonova metoda

Parametry technické

Využitím tohoto software lze řešit dynamiku pístních kroužků spalovacích motorů a pomocí výsledků lze optimalizovat parametry pístních kroužků, jako například předpětí kroužku nebo geometrii kroužku. Vhodným nastavením parametrů pístních kroužků lze dosáhnout nižších třecích ztrát, které se projeví nižší spotřebou motoru a tím lepší ekonomikou provozu.

Parametry ekonomické

Program je napsán v prostředí Matlab včetně interaktivního uživatelského prostředí. Dílčí vstupy jsou zadávány prostřednictvím MS Excel. Software lze šířit zdarma a používat k nekomerčním účelům. Uživatel však není oprávněn software či jeho součásti jakkoliv měnit. Pro komerční využití je třeba se obrátit na autora:

doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

Novotny.pa@fme.vutbr.cz

tel: +420541142272

Využití mimo autorský kolektiv

ČVUT Praha, Buzuluk a.s, ŠKODA AUTO a.s.

Kontaktní osoba

Doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

Telefon

+420541142272

Místnost

A1/616

Prohlášení

Prohlašuji, že popsany výsledek naplňuje definici uvedenou v Metodice hodnocení výsledku výzkumu, experimentálního vývoje a inovací pro rok 2010, a že jsem si vědom důsledku plynoucích z porušení § 14 zákona č. 130/2002 Sb. (ve znění platném od 1. července 2009). Prohlašuji rovněž, že na požádání předložím technickou dokumentaci výsledku.



.....
doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.



**Institute of
Automotive Engineering**

RingDYN 2.0 – teoretické předpoklady a numerické řešení

Pavel Novotny

Teorie RingDYN 2.0

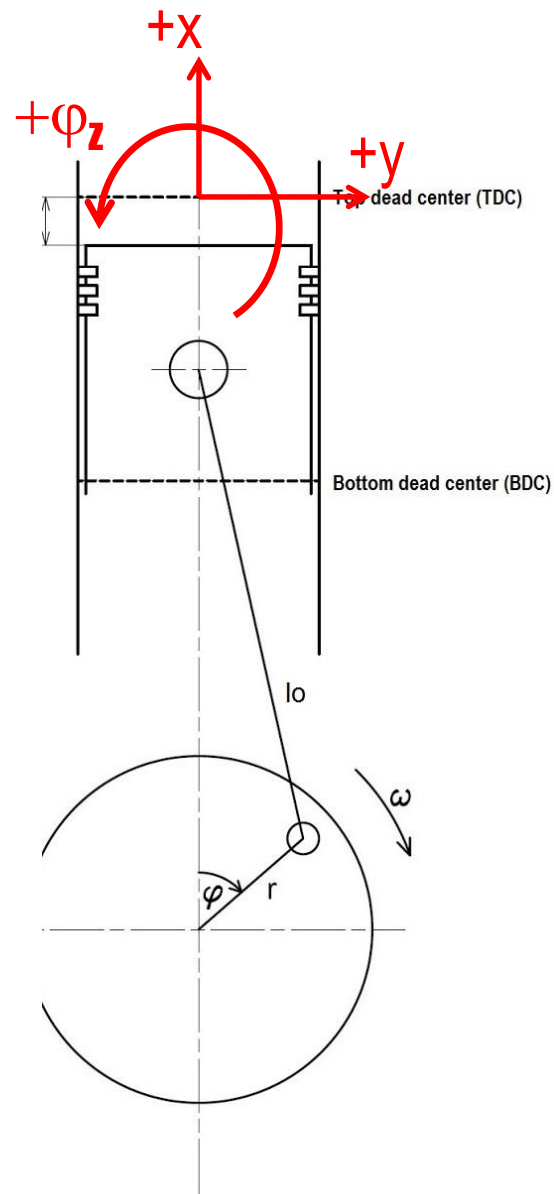
Základní předpoklady



Globální souřadnicový systém

■ Globální souřadnicový systém – spojen s vložkou válce

- $x = 0$ v TDC
- $y = 0$ v ose válce



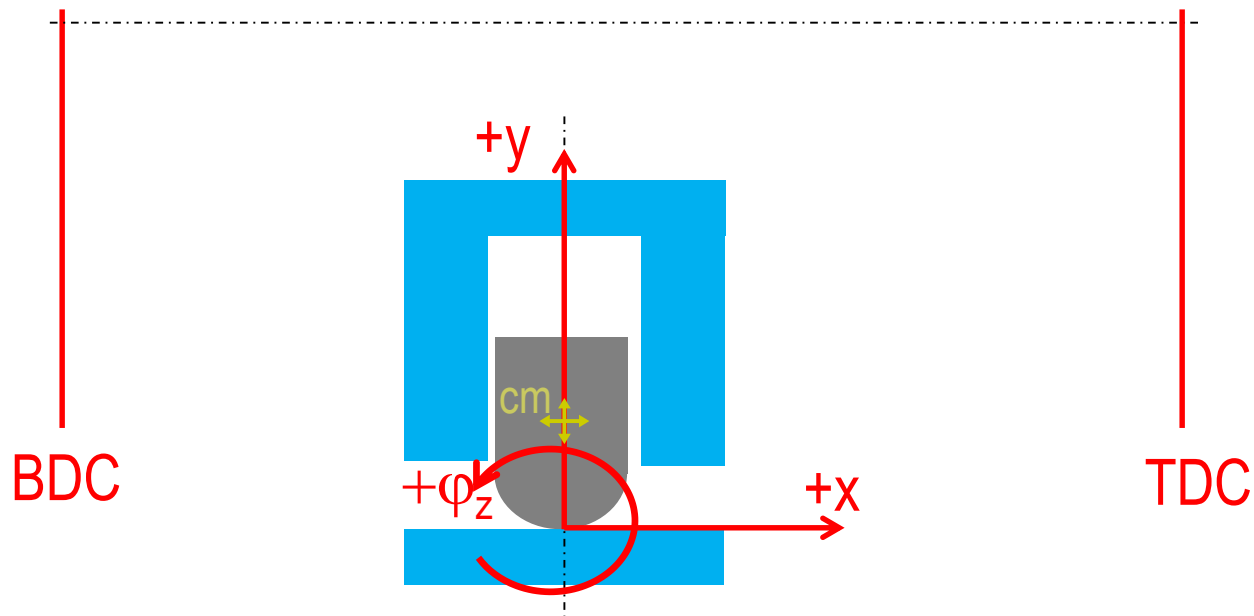
Lokální souřadnicový systém

■ Globální souřadnicový systém kroužku – spojen s vložkou

- $x = 0$ leží na povrchu vložky válce

■ Lokální souřadnicový systém kroužku – spojen s pístem

- $x = 0$ leží na povrchu vložky válce
- $y = 0$ prochází těžištěm kroužku



Názvosloví kódu programu

■ Globální zápis: **X.yZ**

- X – globální proměnná
- y – název proměnné / konstanty (může být více písmen)
- Z – příslušnost

■ Globální proměnná

- S – řešič (solver)
- N – nastavení numerického řešení
- I – vstupní údaje
- R – výsledky

■ Název proměnné

- Číslo – malá písmena
- Matice – velká písmena

■ Příslušnost (v případě kdy náleží více skupinám)

- H – hydrodynamika
- C – kontakty
- B – profuk (blow-by)
- D – dynamika
- P – píst
- R – kroužek
- L – vložka válce
- O – olej
- A – vzduch

Obecné označení globálních veličin

- X – souřadnice
- V – rychlostí
- A – matice zrychlení
- TEMP – teplota
- VOL – objem
- AREA – plocha
- DIAM – průměr
- H – mezera (mazací, průtoková atd.)
- B – šířka (rozměry rovnoběžně s osou válce)
- L – délka (rozměry kolmo na osu válce)



Obecné označení globalních veličin

- **F** – síla
- **m** – hmotnost
- **P** – tlak
- **PC** – kontaktní tlak
- **PH** – hydrodynamický tlak
- **PG** – tlak plynů
- **radi** – rádius
- **young** – modul pružnosti v tahu
- **poisson** – Poissonův poměr



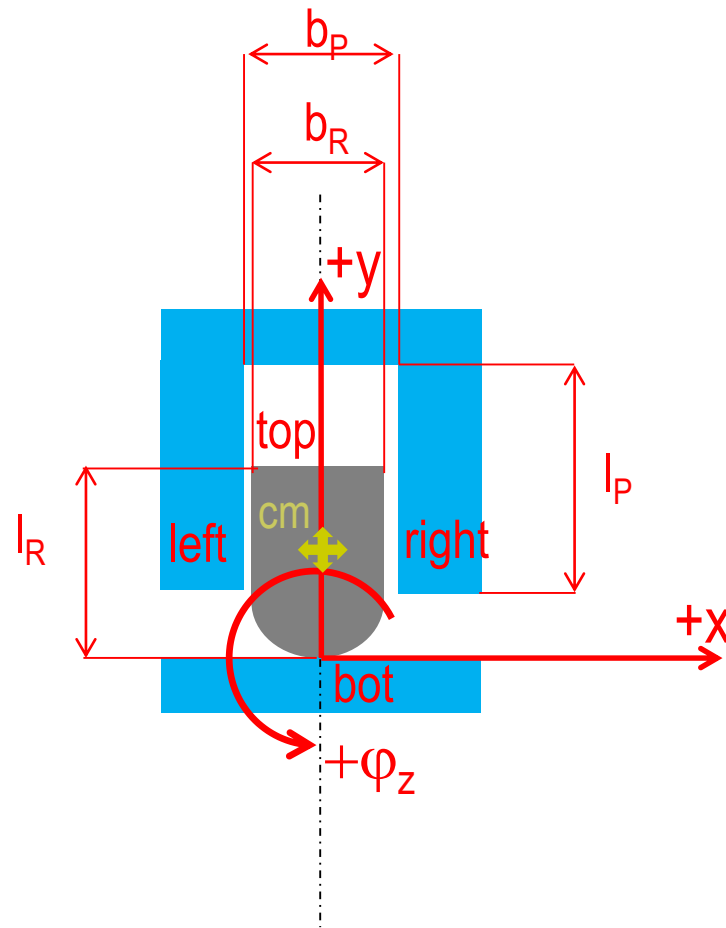
Obvyklé označení proměnných

■ num – počet



Pojmenování rozměrů a oblastí kroužku

- b – rozměr v ose x
- l – rozměr v ose y



Teorie RingDYN 2.0

Řešení integrace pohybové rovnice – nelineární výpočet

- Souřadnice jednoho kroužku (kroužek relativně k pístu)

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \gamma_{k+1} \end{bmatrix} = \mathbf{X}_{k+1}$$

Newton-Raphsonův algoritmus

■ Pohybová rovnice – nelineární tvar

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}_{k+1} = \mathbf{F}_{k+1}^{\text{NL}}(\mathbf{X}_{k+1}, \dot{\mathbf{X}}_{k+1})$$

■ Residuum

$$\mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s) = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}_{k+1} - \mathbf{F}_{k+1}^{\text{NL}}(\mathbf{X}_{k+1}, \dot{\mathbf{X}}_{k+1})$$

■ Aproximace rychlosti (Newmark)

$$\dot{\mathbf{X}}_{k+1} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}(\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k) - \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)\dot{\mathbf{X}}_k - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\Delta t\ddot{\mathbf{X}}_k$$

■ Aproximace zrychlení (Newmark)

$$\ddot{\mathbf{X}}_{k+1} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}(\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{\mathbf{X}}_k - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{\mathbf{X}}_k$$

Newton-Raphsonův algoritmus

■ Základní vztah – Newton-Raphson

$$\mathbf{X}_{k+1}^{s+1} = \mathbf{X}_{k+1}^s - \left(\frac{\partial \mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s)}{\partial \mathbf{X}_{k+1}} \right)^{-1} \mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s)$$

■ Residuum – finální tvar (Newmark)

$$\mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s) = \mathbf{M} \left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} (\mathbf{X}_{k+1}^s - \mathbf{X}_k) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{X}}_k - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{X}}_k \right) - \mathbf{F}_{k+1}^{\text{NL}}(\mathbf{X}_{k+1}^s)$$

■ Derivace residua

$$\mathbf{JAC} = \frac{\partial \mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s)}{\partial \mathbf{X}_{k+1}} = \mathbf{M} \frac{1}{\beta \Delta t^2} - \frac{\partial \mathbf{F}_{k+1}^{\text{NL}}(\mathbf{X}_{k+1}^s)}{\partial \mathbf{X}_{k+1}}$$

■ Výsledný iterační algoritmus

$$\mathbf{X}_{k+1}^{s+1} = \mathbf{X}_{k+1}^s - \omega_{urc} \left(\mathbf{M} \frac{1}{\beta \Delta t^2} - \frac{\partial \mathbf{F}_{k+1}^{\text{NL}}(\mathbf{X}_{k+1}^s)}{\partial \mathbf{X}_{k+1}} \right)^{-1} \mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s)$$

$$\mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s) = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}_{k+1} - \mathbf{F}_{k+1}^{\text{NL}}(\mathbf{X}_{k+1}^s)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_{k+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k) - \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \dot{\mathbf{X}}_k - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \ddot{\mathbf{X}}_k$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_{k+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} (\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{X}}_k - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{X}}_k$$



■ Výsledný iterační algoritmus

$$\mathbf{X}_{k+1}^{s+1} = \mathbf{X}_{k+1}^s - \omega_{urc} \left(\mathbf{M} \frac{1}{\beta \Delta t^2} - \frac{\partial \mathbf{F}_{k+1}^{NL}(\mathbf{X}_{k+1}^s)}{\partial \mathbf{X}_{k+1}} \right)^{-1} \mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s)$$

$$\mathbf{R}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}^s) = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}_{k+1} (1 - \alpha_f) \mathbf{F}_{k+1}^{NL}(\mathbf{X}_{k+1}^s) - \alpha_f \mathbf{F}_k^{NL}(\mathbf{X}_k^s)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_{k+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k) - \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \dot{\mathbf{X}}_k - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \ddot{\mathbf{X}}_k$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_{k+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} (\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{X}}_k - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{X}}_k$$

Teorie RingDYN 2.0

Kontakty nerovností

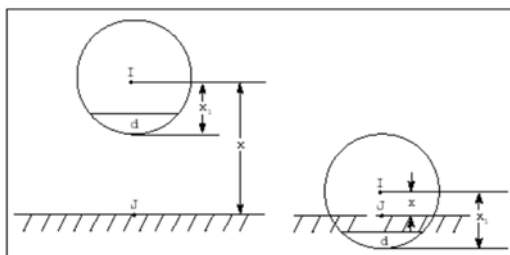


■ $\text{penetrance} = p = h_{s_{\text{lim}}} - h_s$

■ $F(h_s) = \text{MAX}(0, a \cdot (h_{s_{\text{lim}}} - h_s)^b - \text{STEP}(h_s, h_{s_{\text{lim}}} - d, c_{\text{max}}, h_{s_{\text{lim}}}, 0) \cdot v)$

■ $d = 1, c_{\text{max}} \rightarrow v_{\text{stup}}$

Figure 1. Example Illustrating the IMPACT Function



The equation defining IMPACT is:

$$\text{IMPACT} = \begin{cases} \text{Max}(0, k(x_1 - x)^c - \text{STEP}(x, x_1 - d, c_{\text{max}}, x_1, 0) \cdot \dot{x}) & : x < x_1 \\ 0 & : x \geq x_1 \end{cases}$$

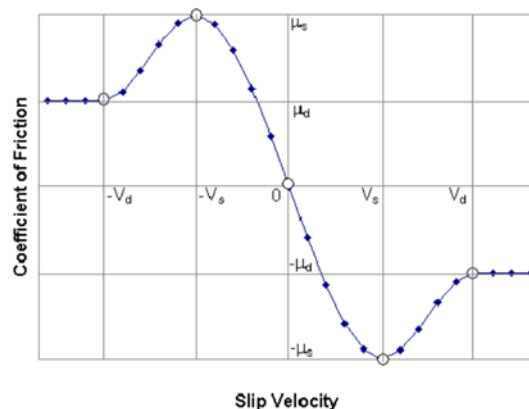
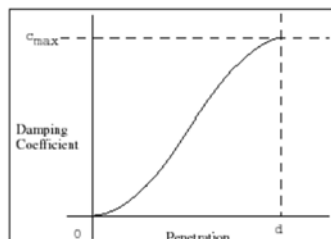
Note that when:

- $x > x_1$, no penetration occurs and the force is zero (penetration $p = 0$)
- $x < x_1$, penetration occurs at the end closer to the J marker, and the force is > 0 (penetration $p = x_1$)

Also note that when $p < d$, the instantaneous damping coefficient is a cubic step function of the penetrator. When $p > d$, the instantaneous damping coefficient is c_{max} .

Adams/Solver (C++) never returns a negative force for IMPACT. If the above expression is negative, Ada

Figure 2. Damping Coefficient versus Penetration



In this simple model:

- $\mu(-v_s) = \mu_s$
- $\mu(v_s) = -\mu_s$
- $\mu(0) = 0$
- $\mu(-v_d) = \mu_d$
- $\mu(v_d) = -\mu_d$
- $\mu(v) = -\text{sign}(v) \cdot \mu_d$ for $|v| > v_d$
- $\mu(v) = -\text{step}(|v|, v_d, \mu_d, v_s, \mu_s) \cdot \text{sign}(v)$ for $v_s \leq |v| \leq v_d$
- $\mu(v) = \text{step}(v, -v_s, \mu_s, v_d, -\mu_d)$ for $-v_s < v < v_s$

where:

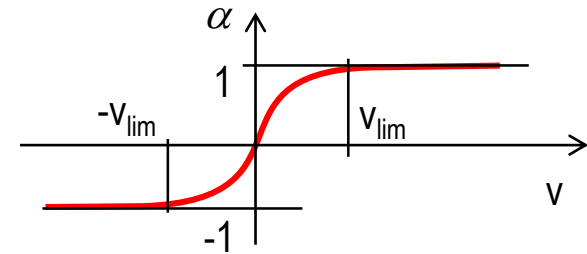
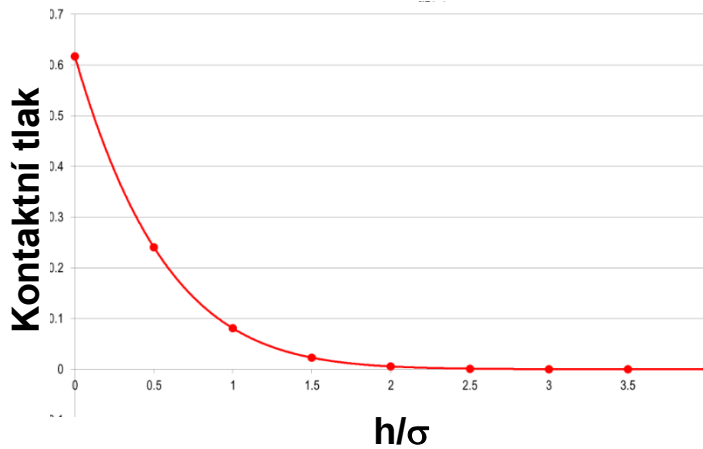
v : Slip velocity at contact point

v_s : STICITION_TRANSITION_VELOCITY

v_d : FRICTION_TRANSITION_VELOCITY

μ_s : MU_STATIC

- Zadána funkce popisující napětí v závislosti na poměru h/σ



- Kontaktní tlak

$$p = d + ae^{-((h/\sigma - b)/c)^2}$$

- Kontaktní síla

$$F_C = \pi D \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx$$

- Třecí síla

$$F_{Ct} = \alpha F_C f$$

Kontaktní funkce

■ Funkce $[F, p] = \text{CTAFORCE}()$

■ Vstupní veličiny

■ x – poloha kroužku vzhledem k pístu pro určení směru kontaktní síly

■ v

■ h

■ D

■ COEF – vektor obsahující konstanty a, b, c, d, c_f, σ pro výpočet kontaktního tlaku

■ Výstupní veličiny

■ F_x

■ F_y

■ p

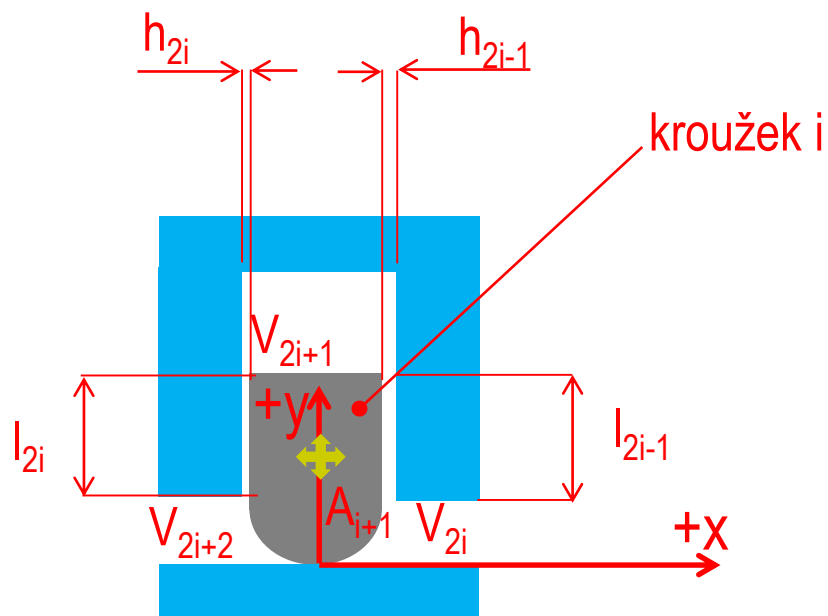
Teorie RingDYN 2.0

Řešení profuku písní skupinou



Označení veličin

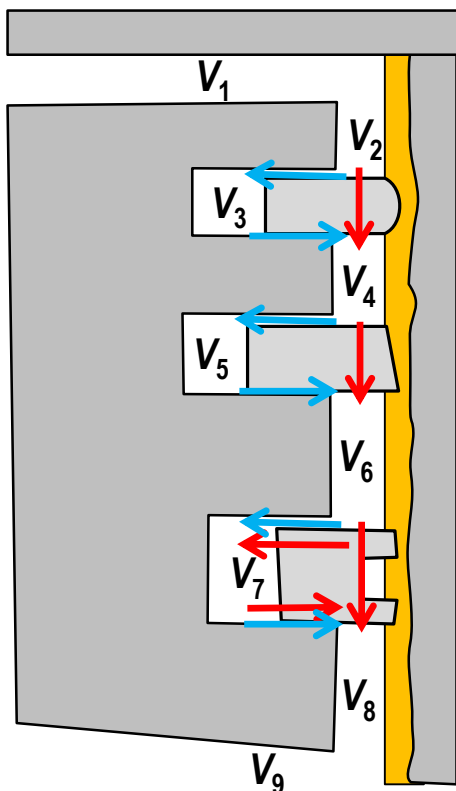
■ i – pořadí kroužku



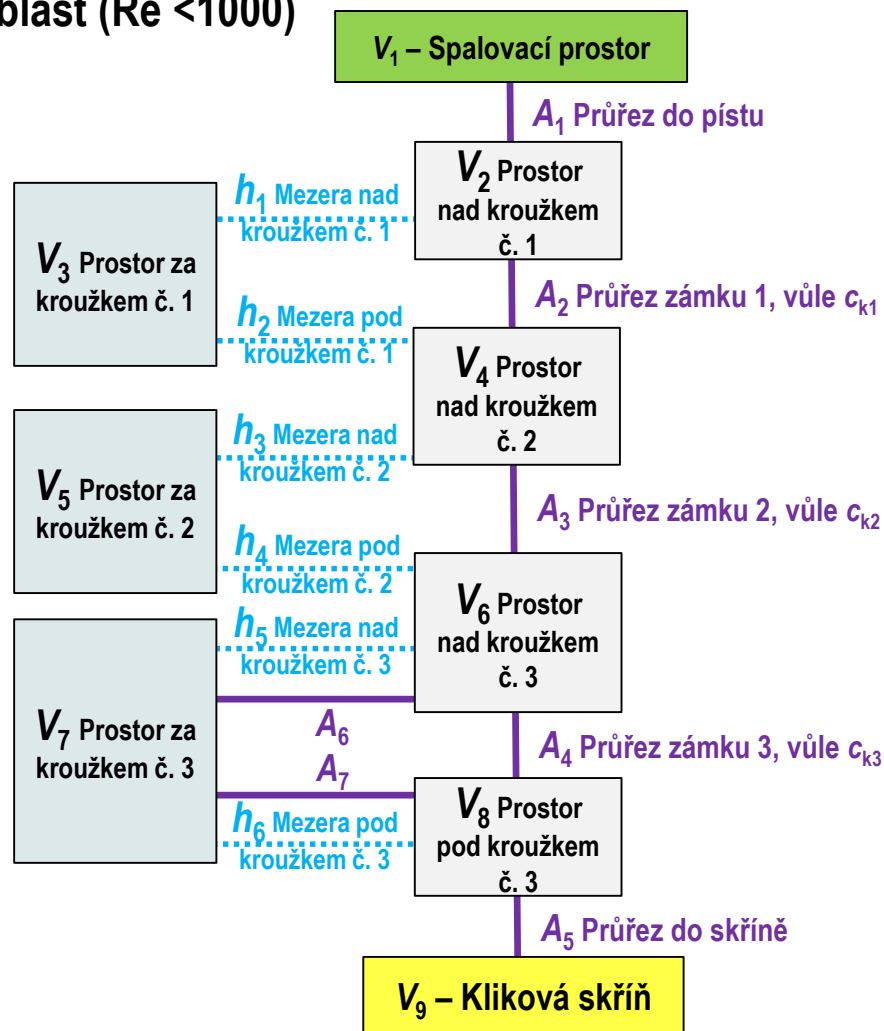
Model profuku pístní skupinou

- Tok plynů malým otvorem – izoentropický tok plynů
- Tok plynů tenkou mezerou – laminární oblast ($Re < 1000$)

Funkční schéma



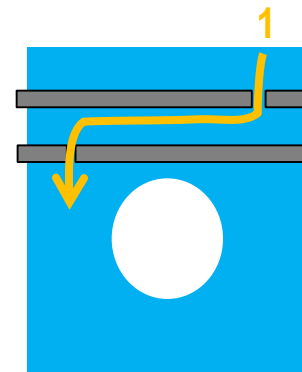
Blokové schéma



Model profuku písní skupinou

■ Hmotnostní tok plynu malým otvorem (function DMT)

$$\dot{m} = A_E \rho_1 \sqrt{\kappa R T_1} \quad \text{pro} \quad \left(\frac{p_1}{p_0} \right) \leq \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$
$$\dot{m} = A_E \sqrt{\rho_0 p_0} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left(\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right)} \quad \text{pro} \quad \left(\frac{p_1}{p_0} \right) > \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$



■ Hmotnostní tok plynu tenkou mezerou (function DMTS)

$$\dot{m} = \int_{\varphi} \rho \left(-\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + U \frac{h}{2} \right) d\varphi$$

A_E ...efektivní průřez

T ...teplota

p ...tlak

κ ...polytropický exponent

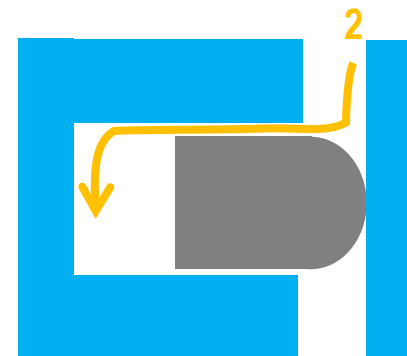
ρ ...hustota

R ...plynová konstanta

φ ...úhel

h ...axiální vůle mezi kroužkem a drážkou pístu

U ...radiální rychlost kroužku vůči pístu



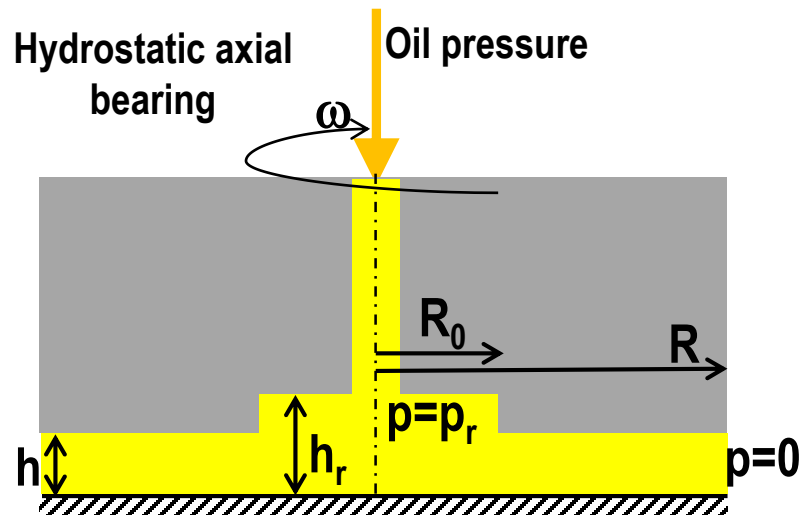
Hmotnostní tok plynu tenkou mezerou (function DMTS)

■ Theory: Volume flow of axial hydrostatic bearing

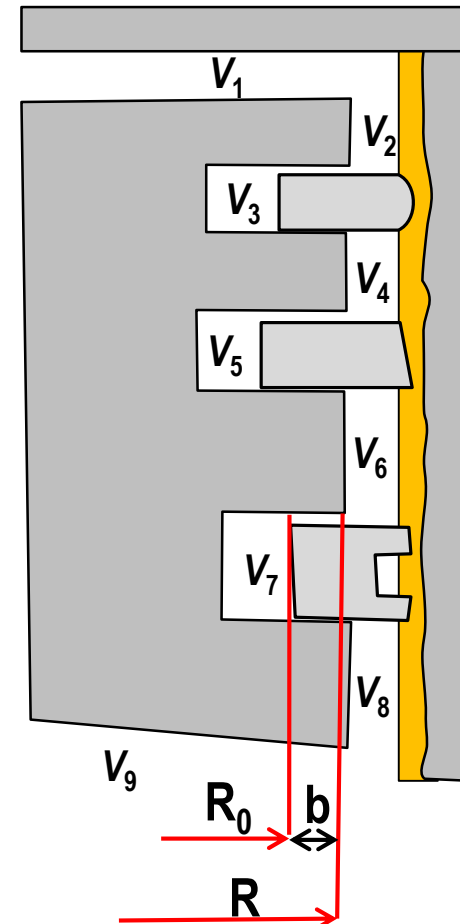
$$\dot{m} = \int_{\varphi} \rho \left(-\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + U \frac{h}{2} \right) d\varphi$$

$$Q = \frac{\pi h^3 p_r}{6\eta} \frac{1}{\ln(R / R_0)}$$

$$Q = \frac{\pi h^3 p_r}{6\eta} \frac{1}{\ln\left(\frac{R}{R - 2 \cdot b}\right)}$$



Funkční schéma



■ Funkce

$P = \text{BLOWBY}(P, dt, \text{angle}, \text{astep}, \text{TEMP}, \text{VOL}, \text{AREA}, H, L, \text{DIAM}, \text{ANGLEDDB}, P1DB, p9, \text{GCOEF})$

■ Výstupní parametry (lokální veličiny)

- P – tlaky v jednotlivých objemech

■ Vstupní parametry (lokální veličiny)

- P – tlaky předchozího kroku [1:9]
- dt – časový krok
- angle – aktuální úhel
- TEMP – teploty v jednotlivých objemech [1:9]
- VOL – objemy [1:9]
- AREA – průřezy [1:7]
- HEIGHT – výška mezery height [1:6]
- LENGTH – délka mezery [1:6]
- DIAM – střední průměr mezery [1:6]
- angle_db – combustion pressure vs. angle data
- pressure_db – combustion pressure vs. angle data
- P9 – tlak ve skříni
- COEF – zahrnuje konstanty (polytropic exponent, gas constant, schall koefficient)

Teorie RingDYN 2.0

Síly od tlaků plynů

Základní schéma

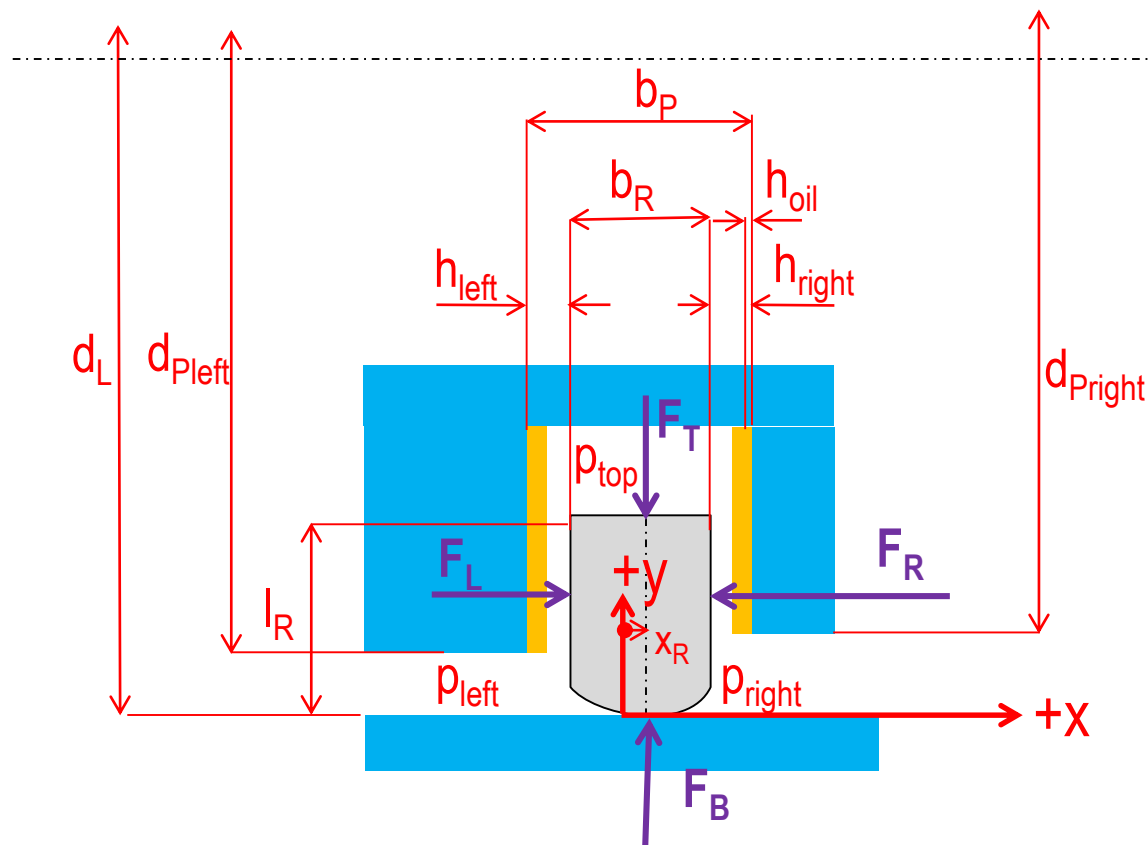
■ Funkce [FR,FL,FT,FB] =
GASFORCE(xR,XH,ptop,pright,pleft,dL,dPright,dPleft,IR,bR,bP,hoil)

■ Vstupní veličiny

- xR
- XH
- ptop
- pright
- pleft
- diamL
- diamPleft
- diamPrigh
- IR
- bR
- bP
- hoil

■ Výstupní veličiny

- FBx, FLx, FTx, FBx
- FBy, FLy, FTy, FBy



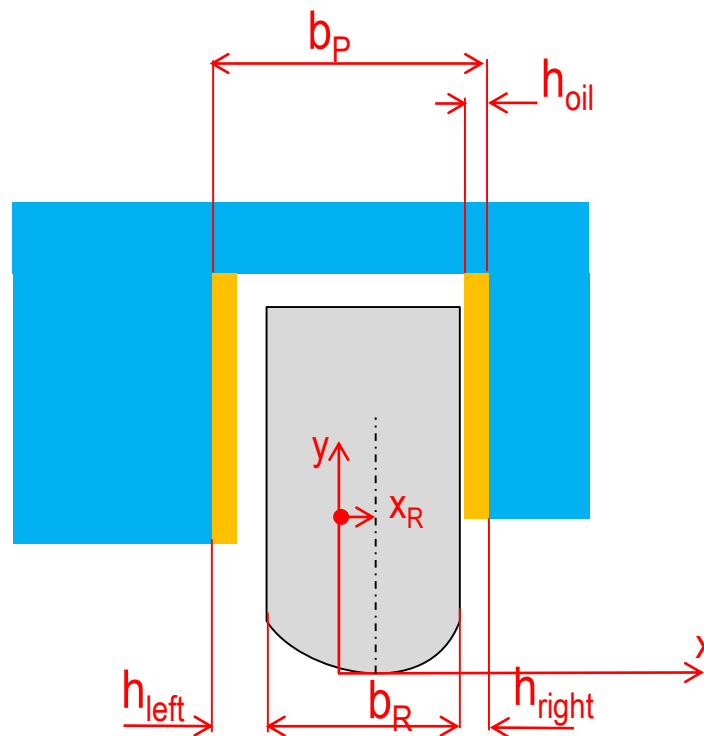
■ Vnitřní průměr kroužku

$$d_R = d_L - 2I_R$$

■ Šířka mezery

$$h_{right} = 0,5(b_P - b_R) - x_R$$

$$h_{left} = 0,5(b_P - b_R) + x_R$$



Výpočet sil

$$F_{Lx} = \frac{\pi}{4} \left[p_{left} (d_L^2 - d_{pleft}^2) + \alpha_{left} \frac{(p_{left} + p_{top})}{2} (d_{pleft}^2 - d_R^2) \right]$$

$$F_{Ly} = 0$$

$$F_{Lz} = \pi d_c \left[\Delta y \sum_{i=1}^n p_{lfti} y_i + p_{lft} |l_1 - y_1| \frac{(l_1 + y_1)}{2} \right]$$

$$F_{Rx} = -\frac{\pi}{4} \left[p_{rgh} (d_L^2 - d_{Prgh}^2) + \alpha_{left} \frac{(p_{rgh} + p_{top})}{2} (d_{Prgh}^2 - d_R^2) \right]$$

$$F_{Ry} = 0$$

$$F_{Rz} = \pi d_c \left[\Delta y \sum_{i=1}^n p_{rghi} y_i + p_{rgh} |l_1 - y_1| \frac{(l_1 + y_1)}{2} \right]$$

$$F_{Tx} = 0$$

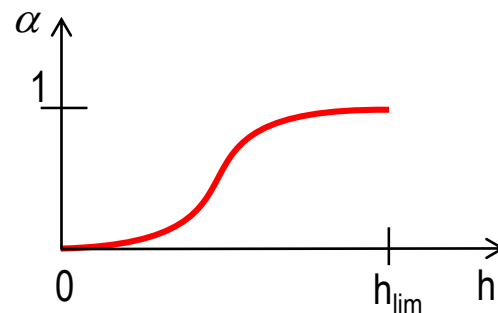
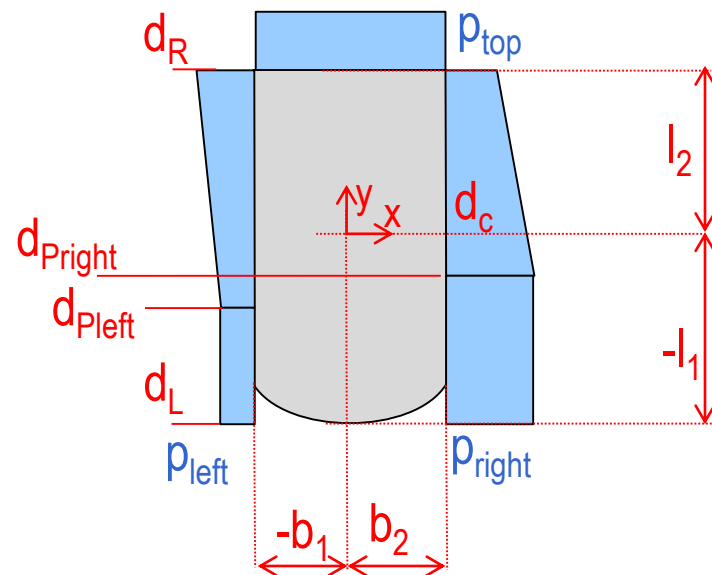
$$F_{Ty} = -\pi p_{top} d_R b_R$$

$$F_{Tz} = -\pi d_R \Delta x \sum_{i=1}^n p_{top} x_i = \pi d_R \left[p_{top} b_1 \frac{b_1}{2} - p_{top} b_2 \frac{b_2}{2} \right] = \pi d_R p_{top} \left[b_1 \frac{b_1}{2} - b_2 \frac{b_2}{2} \right]$$

$$F_{Bx} = 0$$

$$F_{By} = \pi d_L (p_{right} (b_2 - |x_2|) + p_{left} (b_1 - |x_1|))$$

$$F_{Bz} = \pi d_L \left(p_{right} (b_2 - |x_2|) \frac{b_2 + |x_2|}{2} - p_{left} (b_1 - |x_1|) \frac{b_1 + |x_1|}{2} \right)$$



$$h_{lim} = 3,5\sigma$$

$$\alpha_{left} = STEP(h_{left}, 0, 0, h_{lim}, 1) \quad \alpha_{right} = STEP(h_{right}, 0, 0, h_{lim}, 1)$$



Teorie RingDYN 2.0

Hydrodynamika



RE

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12 \eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12 \eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + v_y$$

Substituce

$$H = \frac{h}{\sigma}; \quad X = \frac{x}{\sigma}; \quad P = p \sigma; \quad \xi = \frac{H^3}{12 \eta};$$

Dosazení

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\xi \frac{\partial P}{\partial X} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial H}{\partial X} + v_y$$

■ Tlakový člen

$$\left(\frac{\partial}{\partial X} \left(\xi \frac{\partial P}{\partial X} \right) \right)_i \cong \frac{\xi_{i+1/2} P_{i+1} - (\xi_{i+1/2} + \xi_{i-1/2}) P_i + \xi_{i-1/2} P_{i-1}}{h_x^2}$$

$$\xi_{i\pm 1/2} = \frac{\xi_{i+1} \pm \xi_i}{2}$$

■ Klínový člen

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{\rho} H}{\partial X} \Big|_i \cong \frac{U_{i,j}}{2} \frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{h_x}$$

■ Časový člen v_y je konstantní

■ Funkcionál

$$L(P_i) = \frac{\xi_{i+1/2} P_{i+1} - (\xi_{i+1/2} + \xi_{i-1/2}) P_i + \xi_{i-1/2} P_{i-1}}{h_X^2} - \frac{U_{i,j}}{2} \frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{h_X} - v_y$$

■ Residum

$$r_i = \frac{\xi_{i+1/2} P_{i+1} - (\xi_{i+1/2} + \xi_{i-1/2}) P_i + \xi_{i-1/2} P_{i-1}}{h_X^2} - \frac{U_{i,j}}{2} \frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{h_X} - v_y$$

■ Jacobian

$$J_i = \frac{\partial L(P_i)}{\partial P_i} = - \frac{(\xi_{i+1/2} + \xi_{i-1/2})}{h_X^2}$$

■ Nový tlak

$$P_i^N = P_i + \omega \frac{r_i}{J_i} \qquad P_i^N > P_{cav}$$

■ Chyba

$$e = \frac{\left| \int_{-hr/2}^{hr/2} P^N dx - \int_{-hr/2}^{hr/2} P dx \right|}{\int_{-hr/2}^{hr/2} P^N dx}$$

■ Síla

$$\int_{-hr/2}^{hr/2} P dx = \frac{1}{2}(P_1 + P_n) + \sum_{i=2}^{n-1} P_i$$

■ Smykové napětí

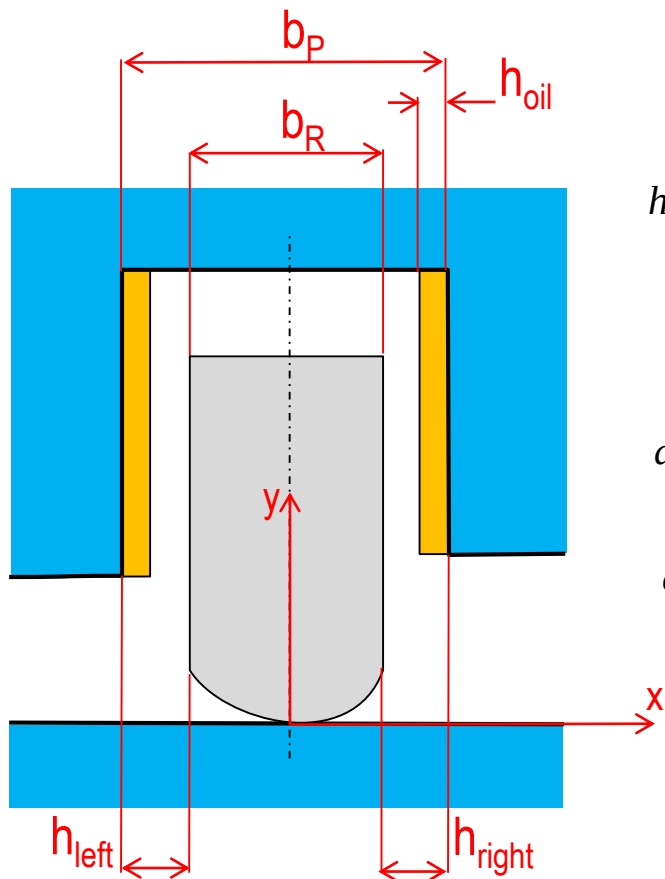
$$\tau = \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\eta U}{h}$$

Teorie RingDYN 2.0

Hydrodynamika axiálního pohybu

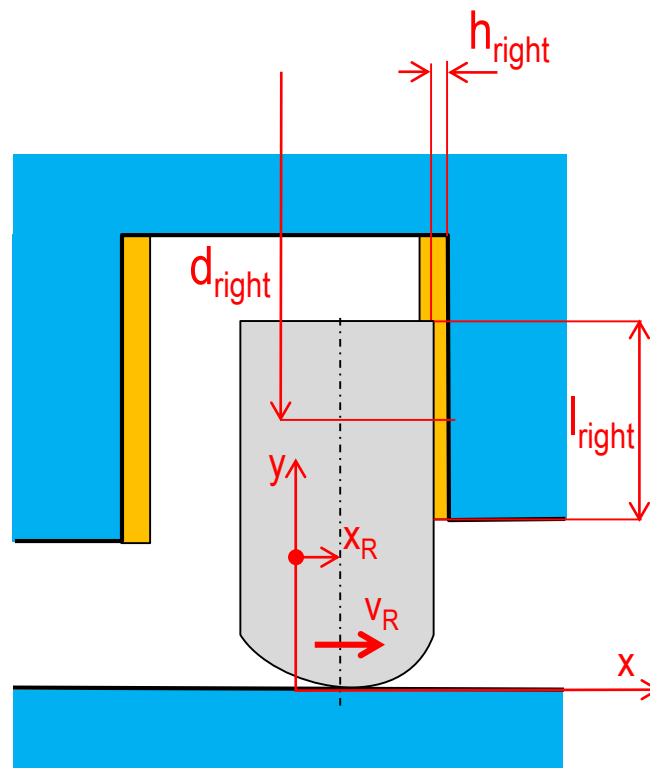


Počáteční stav



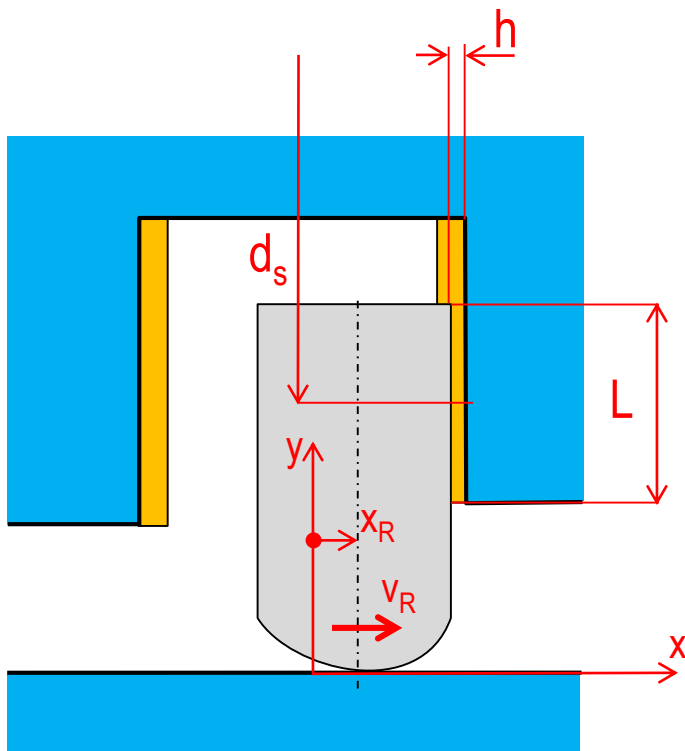
$$F = 0$$

Vymezený stav



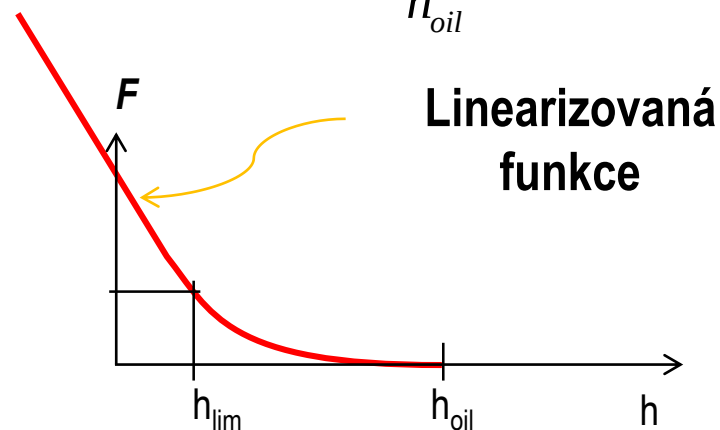
$$F = -\frac{\eta L^3 \pi d}{h^3} v_R$$

Určení tlumicí síly



$$v_R > 0 \quad F = -\frac{\eta l^3 \pi d}{h^3} v_R + F_0$$

$$F_0 = \frac{\eta l^3 \pi d}{h_{oil}^3} v_R$$



$$p_{\max} = \frac{6\eta L^2}{4h^3} v_R$$

Kontakt

■ doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D

Phone: +420 541 142 272

E-mail: novotny.pa@fme.vutbr.cz

Web: www.uadi.fme.vutbr.cz

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Automotive Engineering
NETME Centre
Technická 2
616 69 Brno
Czech Republic

