

BRNO, 20. 6. 2008

## Optimalizace průtokových poměrů v mazacích obvodech s progresivními rozdělovači pomocí genetických algoritmů

VUT v Brně  
Fakulta strojního inženýrství

doktorand

Ing. Jiří Vepřek, yvepre01@vutbr.cz

škoolitelé

Prof. Ing. RNDr. Josef Nevrlý, CSc.  
Doc. Ing. Pavel Ošmera, CSc.

## ■ OBSAH PREZENTACE

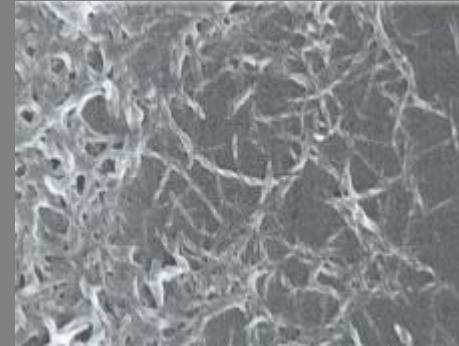
### ■ cíle disertační práce

- Úvod
- Numerické řešení toku plastických maziv
- Experimentální měření
- Optimalizace progresivních mazacích obvodů pomocí genetických algoritmů (GA)
- Publikační činnost
- Závěr

# ■ PLASTICKÁ MAZIVA

## ■ složení a fyzikální vlastnosti

- Koloidní soustavy
  - mazací olej (70-90%)
  - mýdla kovů lithia, sodíku, vápníku, hliníku (5-30%)
  - antioxidanty, antikorodanty, vysokotlaké přísady (0,5-5%)
- Popis vlastností
  - konzistence (stupnice organizace NLGI)
  - bod skápnutí
  - reologické modely



tvár vláken lithného maziva ve zvětšení 30 000x pod skenovacím mikroskopem SEM [Czarny, 2004]

# ■ PLASTICKÁ MAZIVA

## ■ reologické modely

- Binghamův reologický model  $B = H-(StV/N)$

- Hookova pružina (1. část)

$$\gamma_1 = \frac{\tau_1}{G} \quad (1)$$

- Newtonův píst (2. část)

$$\gamma_1 = \frac{\tau_1}{G} \quad (2)$$

- Saint-Venantův model (3. část)

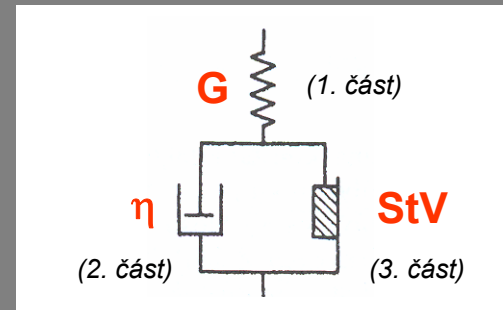
$$\gamma_3 = 0 \quad D = 0 \quad \tau_3 < \tau_0 \quad D \neq 0 \quad \tau_3 = \tau_0 \quad (3)$$

- sériové řazení

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad \tau = \tau_1 = \tau_2 \quad (4)$$

- paralelní řazení

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad \gamma = \gamma_1 = \gamma_2 \quad (5)$$



grafická představa  
Binghamova  
reologického modelu  
[Reiner, 1968],  
[Giesekeus, 1994],  
[Kvasnica et al., 2004]

# ■ PLASTICKÁ MAZIVA

## ■ Binghamův model

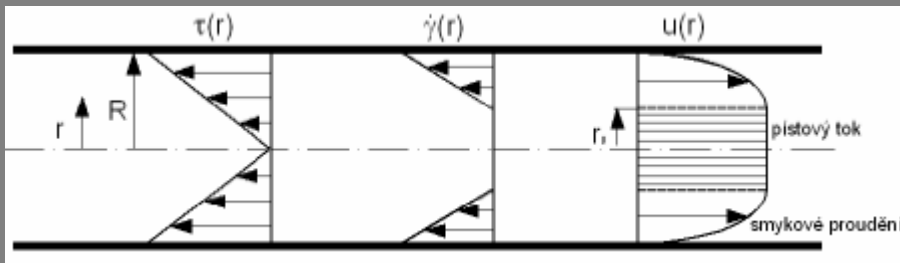
- Výsledné reologické rovnice

$$\gamma_B = \frac{\tau}{G} \quad (\tau < \theta) \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \frac{1}{\eta_B} \cdot (\tau - \tau_f) & \text{pro } \tau \geq \tau_f \\ 0 & \text{pro } -\tau_f \leq \tau \leq \tau_f \\ \frac{1}{\eta_B} \cdot (\tau + \tau_f) & \text{pro } -\tau_f \geq \tau. \end{cases} \quad (7)$$

- Rovnice laminárního toku v potrubí kruhového průřezu

$$v_s = \frac{Q}{\pi \cdot R^2} = \frac{p_z \cdot R^2}{8 \cdot l \cdot \eta_B} \cdot \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{r_0}{R} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{r_0}{R} \right)^4 \right] \quad \text{pro } \tau \geq \tau_0 \quad (8)$$

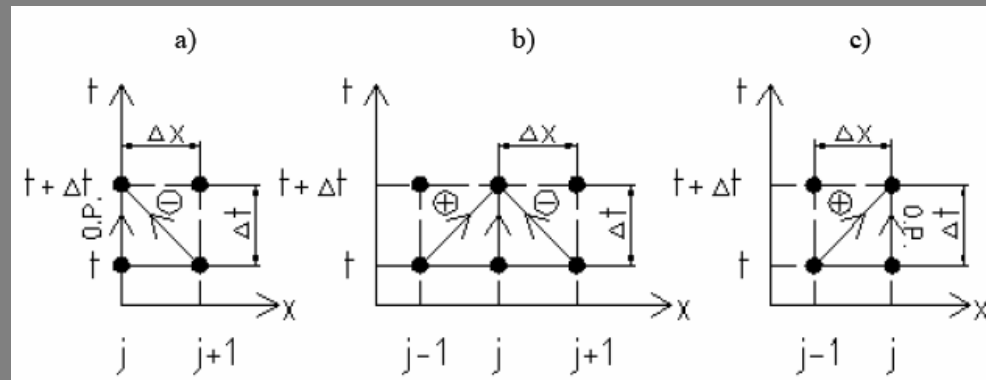


# ■ NUMERICKÁ METODA LAX-WENDROFF

## ■ schéma metody, použití

- Vhodné pro řešení pohybových rovnic ( $p$ ,  $Q$ )
- Využití rozvoje funkce do Taylorovy řady
  - polynom 2. stupně

- a) krok řešení počátečního uzlu
- b) krok řešení vnitřního uzlu
- c) krok řešení koncového uzlu



základní schéma metody Lax-Wendroff [Varchola, 2007],  
[Habán, 2001], [Koiš, 2007]

- Možnost zahrnout  $a$ ,  $E$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $\tau \neq \text{konst.}$  (např. fce  $p$ )

# ■ NUMERICKÁ METODA LAX-WENDROFF

## ■ základní rovnice

- Základní schéma metody

$$f_{x_j}^{t+\Delta t} = f_{x_j}^t + \Delta t \cdot \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{x_j} + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \left. \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right|_{x_j} \quad (9)$$

- Úprava rovnice typu

$$\frac{\partial f}{\partial t} + a \cdot \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial f}{\partial t} = -a \cdot \frac{\partial f}{\partial x} \quad (10)$$

- Dosazení rovnice (10) do (9) a rozepsání diferencí

$$f_{x_j}^{t+\Delta t} = f_{x_j}^t - a \cdot \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x} \cdot (f_{x_{j+1}}^t - f_{x_{j-1}}^t) + a^2 \cdot \frac{\Delta t^2}{2 \cdot \Delta x^2} \cdot (f_{x_{j+1}}^t - 2 \cdot f_{x_j}^t + f_{x_{j-1}}^t) \quad (11)$$

- Rovnice silové rovnováhy a kontinuity

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda}{2 \cdot D} \cdot |c| \cdot c = 0 \quad (12) \quad \frac{\partial p}{\partial t} + k \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

# ■ NUMERICKÁ METODA LAX-WENDROFF

## ■ výsledné rovnice (Q, p)

- Vnitřní uzlové body (Q, p)

$$Q_{x_j}^{t+\Delta t} = Q_{x_j}^t - a_Q \cdot p_{x_{j+1}}^t + a_Q \cdot p_{x_{j-1}}^t - b_Q \cdot |Q_{x_j}^t| \cdot Q_{x_j}^t + c_Q \cdot Q_{x_{j+1}}^t - d_Q \cdot Q_{x_j}^t + c_Q \cdot Q_{x_{j-1}}^t + e_Q \cdot p_{x_{j+1}}^t \cdot |Q_{x_{j+1}}^t| - e_Q \cdot p_{x_{j-1}}^t \cdot |Q_{x_{j-1}}^t| + f_Q \cdot (Q_{x_j}^t)^3 \quad (14)$$

$$p_{x_j}^{t+\Delta t} = p_{x_j}^t - g \cdot Q_{x_{j+1}}^t + g \cdot Q_{x_{j-1}}^t + h \cdot p_{x_{j+1}}^t - i \cdot p_{x_j}^t + h \cdot p_{x_{j-1}}^t + j \cdot |Q_{x_{j+1}}^t| \cdot Q_{x_{j+1}}^t - j \cdot |Q_{x_{j-1}}^t| \cdot Q_{x_{j-1}}^t \quad (15)$$

- Počáteční a koncové body (Q, p) – zanedbání rovnice (d)

$$Q_{x_j}^{t+\Delta t} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta X}{4 \cdot k \cdot \Delta t} \cdot (p_{x_j}^{t+\Delta t} - p_{x_j}^t) + Q_{x_{j+1}}^{t+\Delta t} \quad (16)$$

$$Q_{x_j}^{t+\Delta t} = -\frac{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta X}{4 \cdot k \cdot \Delta t} \cdot (p_{x_{j+1}}^{t+\Delta t} - p_{x_{j+1}}^t) + Q_{x_j}^{t+\Delta t} \quad (18)$$

$$p_{x_j}^{t+\Delta t} = -\frac{4 \cdot k \cdot \Delta t}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta X} \cdot (Q_{x_{j+1}}^{t+\Delta t} - Q_{x_j}^{t+\Delta t}) + p_{x_j}^t \quad (17)$$

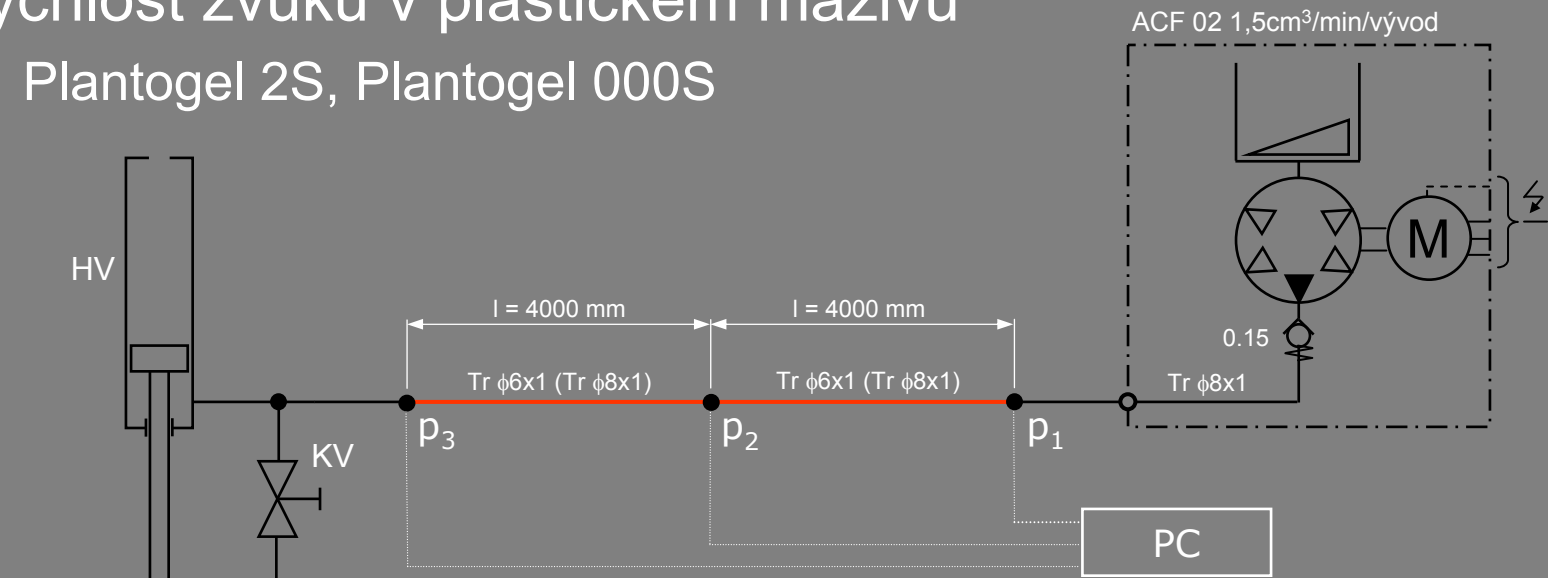
$$p_{x_{j+1}}^{t+\Delta t} = -\frac{4 \cdot k \cdot \Delta t}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta X} \cdot (Q_{x_{j+1}}^{t+\Delta t} - Q_{x_j}^{t+\Delta t}) + p_{x_{j+1}}^t \quad (19)$$



## ■ EXPERIMENT

- popis měřicí traťe, experimentu – Tribologická laboratoř (OFI)

- Rychlost zvuku v plastickém mazivu
  - Plantogel 2S, Plantogel 000S



HV – hydraulický válec, G – zátěž na pístnici (0,5-3,5 MPa)  
p<sub>1-3</sub> – snímač tlaku (BD Sensors, DMP 333, 0-16 MPa)  
ACF 02 – mazací agregát (Tribotec)  
KV – kulový ventil  
Tr 6x1 a Tr 8x1 – experimentální trubky (zinkovány)

## ■ EXPERIMENT

### ■ Metoda určení rychlosti zvuku pomocí 3 měřených tlaků

- Stanovení závislosti  $a = f(p)$
- Metoda je založena na výpočtu vynucených oscilací kapaliny užitím metody přenosových matic [Foldyna et. al, 2007]
  - měření časového průběhu tlaků  $p_1$ ,  $p_2$  a  $p_3$
  - zpracování pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DFT), *určení budících frekvencí, amplitud a fází pro všechny měřené tlaky*
  - určení elementů přenosové matice (rychlost zvuku)
- Doplnění numerického modelu *tok plastického maziva v trubicích mazacího obvodu*

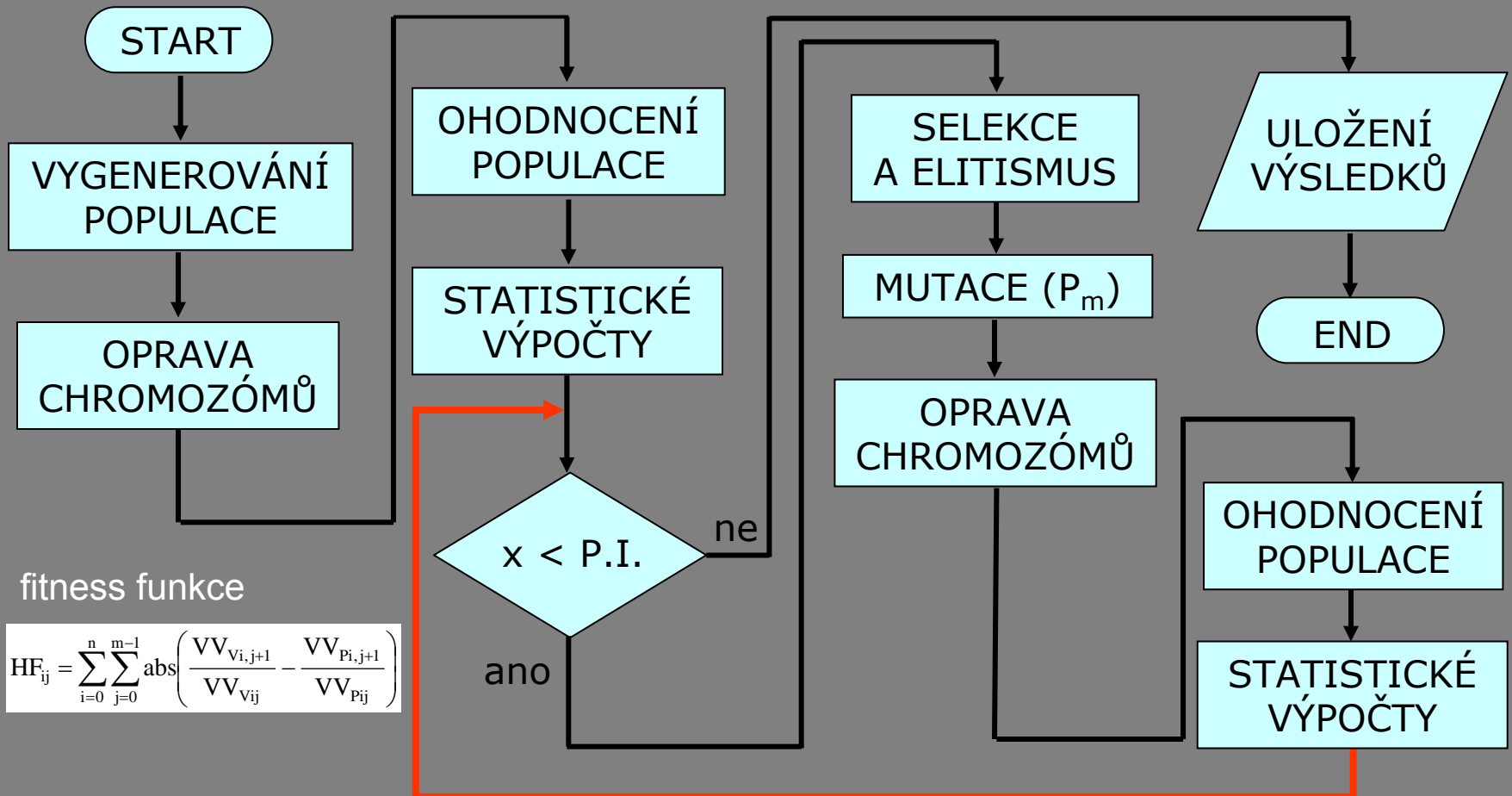
# ■ OPTIMALIZACE MAZACÍCH OBVODŮ

## ■ optimalizační programy s GA

- Optimalizace konstrukčních variant progresivních rozdělovačů ZP-A, ZP-B (Delimon)
  - rozdělovače s libovolným počtem sekcí
  - zadání požadavků  
*počet sekcí, poměr dělení maziva (cm<sup>3</sup>/cyklus)*
- Optimalizace mazacích obvodů s progresivními rozdělovači ZP-A, ZP-B (Delimon)
  - návaznost na předchozí program
  - celková optimalizace mazacího obvodu
  - zahrnutí fyzikálních vlastností maziva
  - optimalizace z více hledisek (technické, ekologické, ekonomické)

# ■ OPTIMALIZAČNÍ PROGRAM – Č. 1

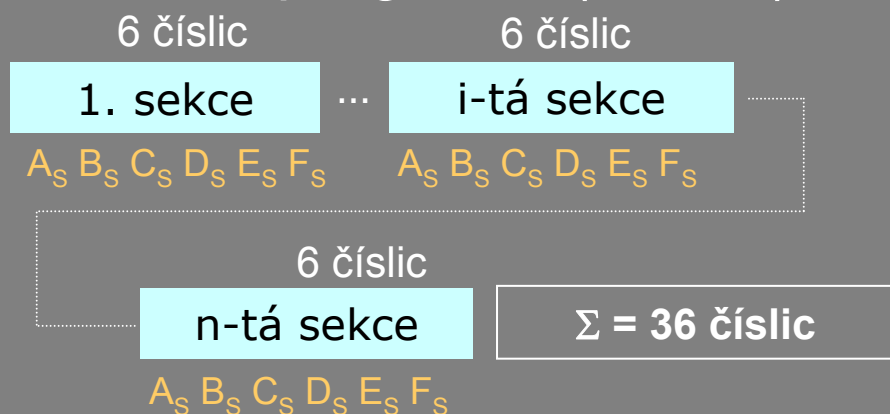
## ■ algoritmus programu



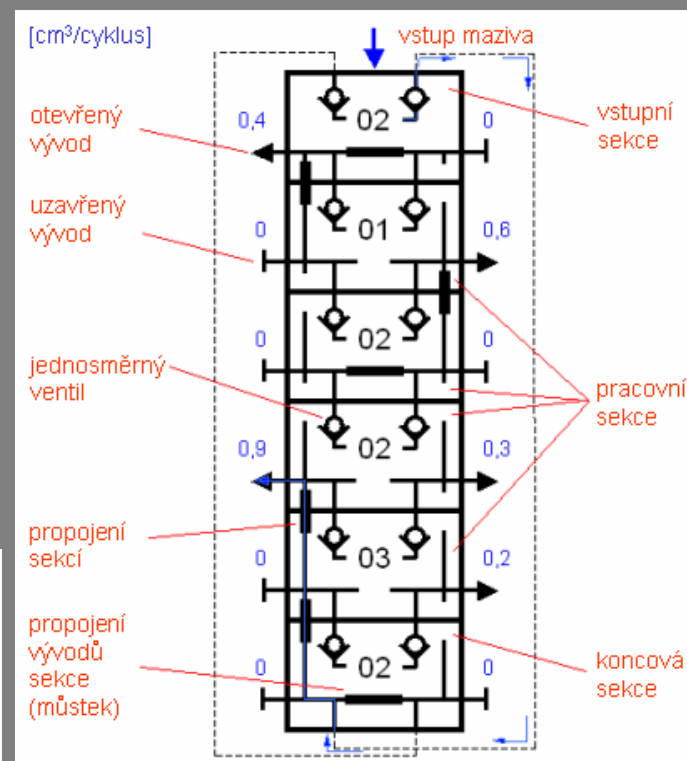
# ■ OPTIMALIZAČNÍ PROGRAM – č. 1

- zakódování struktury rozdělovačů ZP-A, ZP-B (chromozóm)

- Objektově orient. platforma JAVA, Netbeans IDE 5.0
- Struktura programu (1 třída)



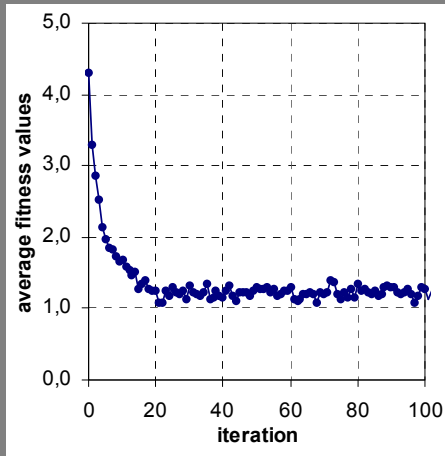
Gene	Gene interpretation
$A_s$	section size (1 = 0,07; 2 = 0,1; 3 = 0,2; 4 = 0,3 cm <sup>2</sup> /per piston stroke)
$B_s$	outlet port connection – bridge (0 = no, 1 = yes)
$C_s$	trough canal connection – left side (0 = no, 1 = yes)
$D_s$	trough canal connection – right side (0 = no, 1 = yes)
$E_s$	left section outlet (0 = closed, 1 = open)
$F_s$	right section outlet (0 = closed, 1 = open)



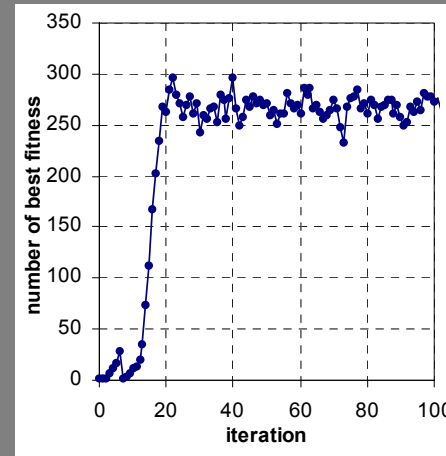
311010 200101 310000 301011 401001 310000

# ■ OPTIMALIZAČNÍ PROGRAM – Č. 1

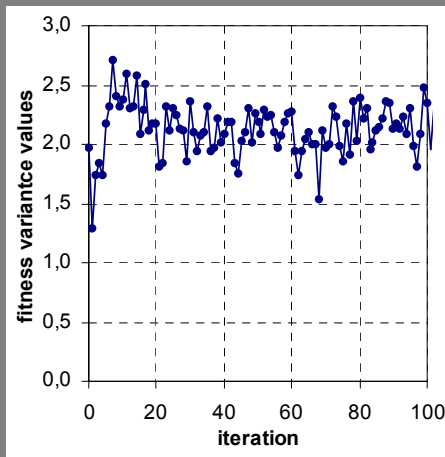
## ■ výsledky (6-ti sekční ZP-A rozdělovač, 6 otevřených vývodů)



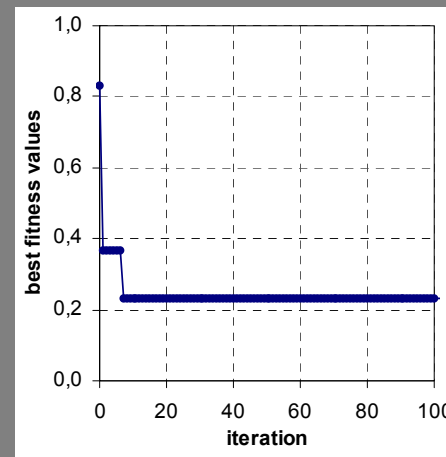
průměrná hodnota  
fitness v populaci  
500 jedinců  
200 iterací  
 $P_m = 1/30$   
selekce  $t = 3$



počet nejlepších  
jedinců z celkové  
populace  
500 jedinců  
200 iterací  
 $P_m = 1/30$   
selekce  $t = 3$



rozptyl fitness  
v populaci  
500 jedinců  
200 iterací  
 $P_m = 1/30$   
selekce  $t = 3$

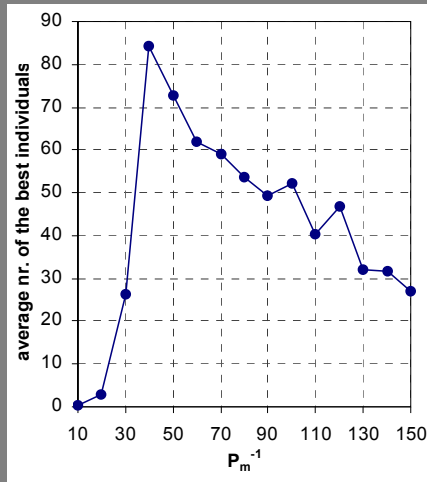


nejlepší hodnota  
fitness v populaci  
500 jedinců  
200 iterací  
 $P_m = 1/30$   
selekce  $t = 3$

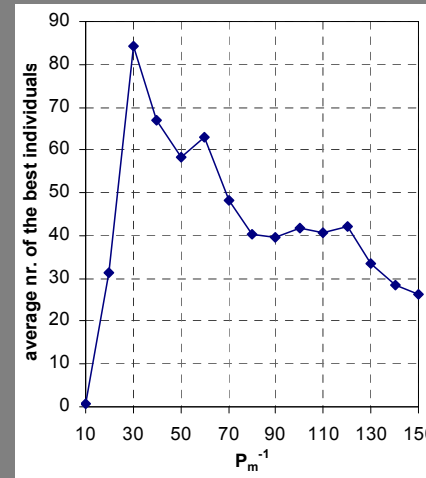
[Vepřek, 2008]

# ■ OPTIMALIZAČNÍ PROGRAM – Č. 1

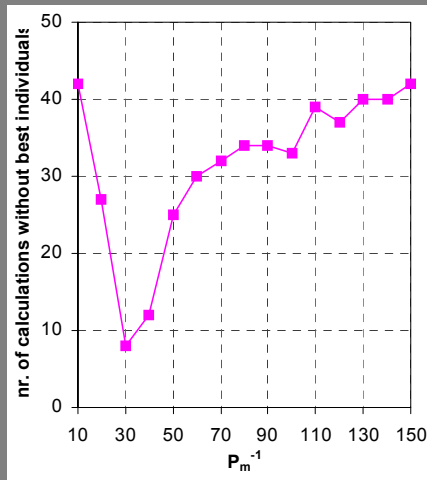
## ■ volba parametrů GA



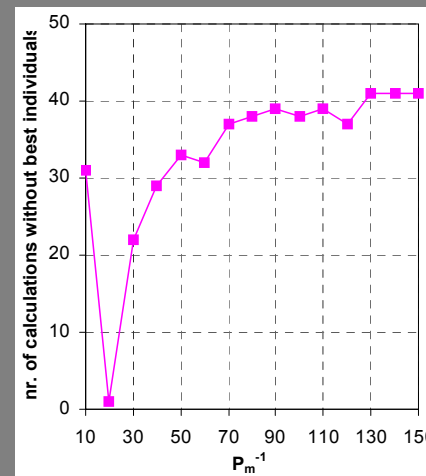
průměrný počet  
nejlepších jedinců  
v populaci  
500 jedinců  
200 iterací  
selekce  $t = 2$   
 $P_m = 1/10-1/150$



počet nejlepších  
jedinců z celkové  
populace  
500 jedinců  
200 iterací  
selekce  $t = 3$   
 $P_m = 1/10-1/150$



počet výpočtů bez  
nejlepších jedinců  
500 jedinců  
200 iterací  
selekce  $t = 2$   
 $P_m = 1/10-1/150$



nejlepší hodnota  
fitness v populaci  
500 jedinců  
200 iterací  
selekce  $t = 3$   
 $P_m = 1/10-1/150$

[Vepřek, 2008]

## ■ OPTIMALIZAČNÍ PROGRAM – Č. 2

### ■ struktura a popis programu

- Objektově orient. platforma JAVA, Netbeans IDE 5.5
- Struktura programu (8 tříd)

- Spusteni.java →
- Generator.java
- Oprava.java
- Fitness.java
- Statistika.java
- Selekcce.java
- Mutace.java
- Simulace.java →

řízení programu  
(metoda main())

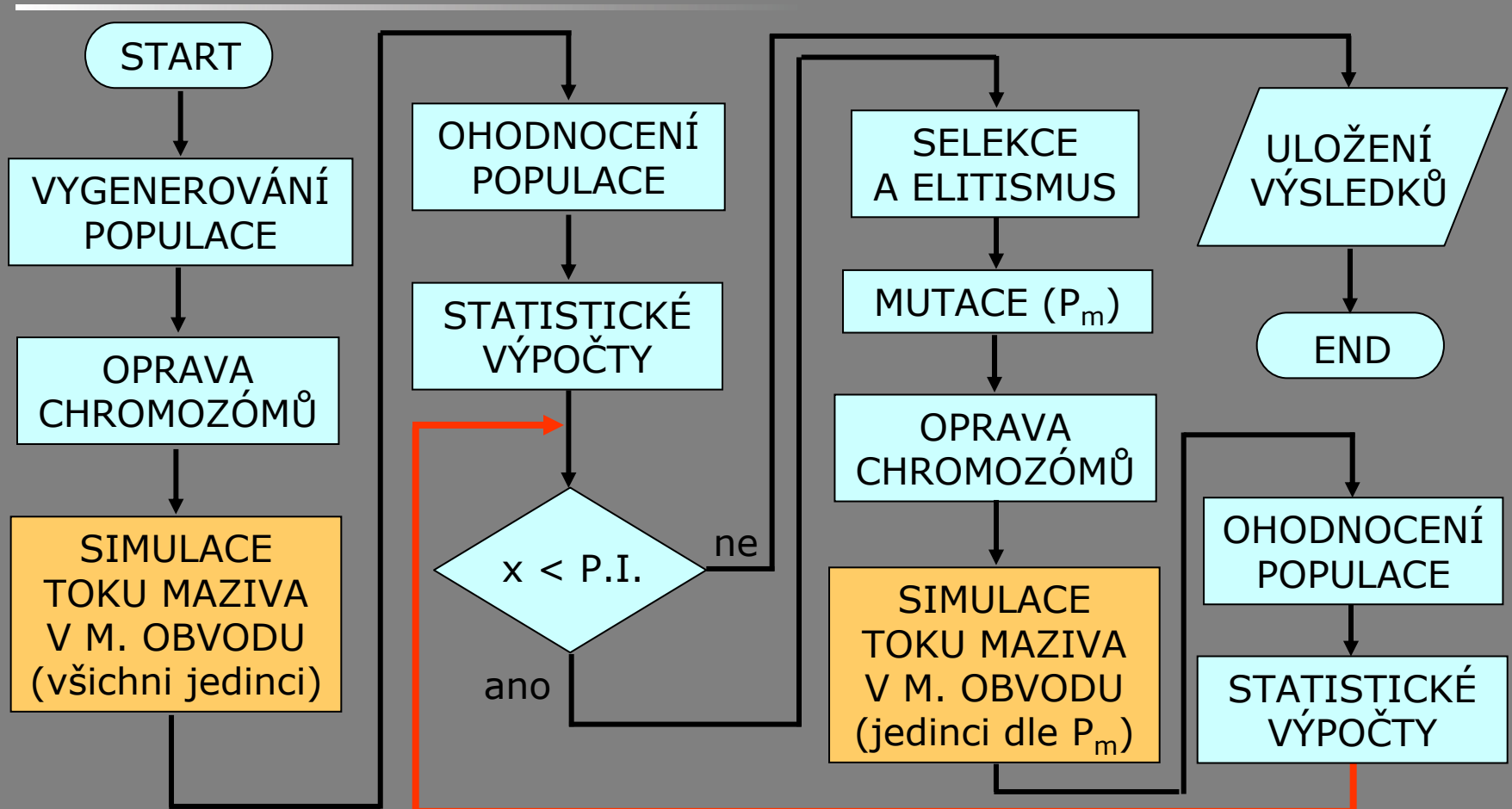
genetický  
algoritmus  
(jádro programu)

numerický model  
reol. r., Lax Vendroff



# ■ OPTIMALIZAČNÍ PROGRAM – č. 2

## ■ algoritmus programu



# ■ OPTIMALIZAČNÍ PROGRAM – Č. 2

## ■ zakódování struktury mazacího obvodu (chromozóm)

108 číslic (0-1) a (1-4)

progresivní rozdělovače

I A B C

9 číslic (0-1)

potrubí od hl. rozdělovače

materiál, délka, průměr

48 číslic (0-1)

potrubí od vedl. rozdělovačů

materiál, délka, průměr

3 číslice (1-3)

hierarchie mazacího obvodu

I – A, I – B, I – C

celkový počet číslic:  $\Sigma = 168$

I 3 sekce, 3 vývody

A 3 sekce, 4 vývody

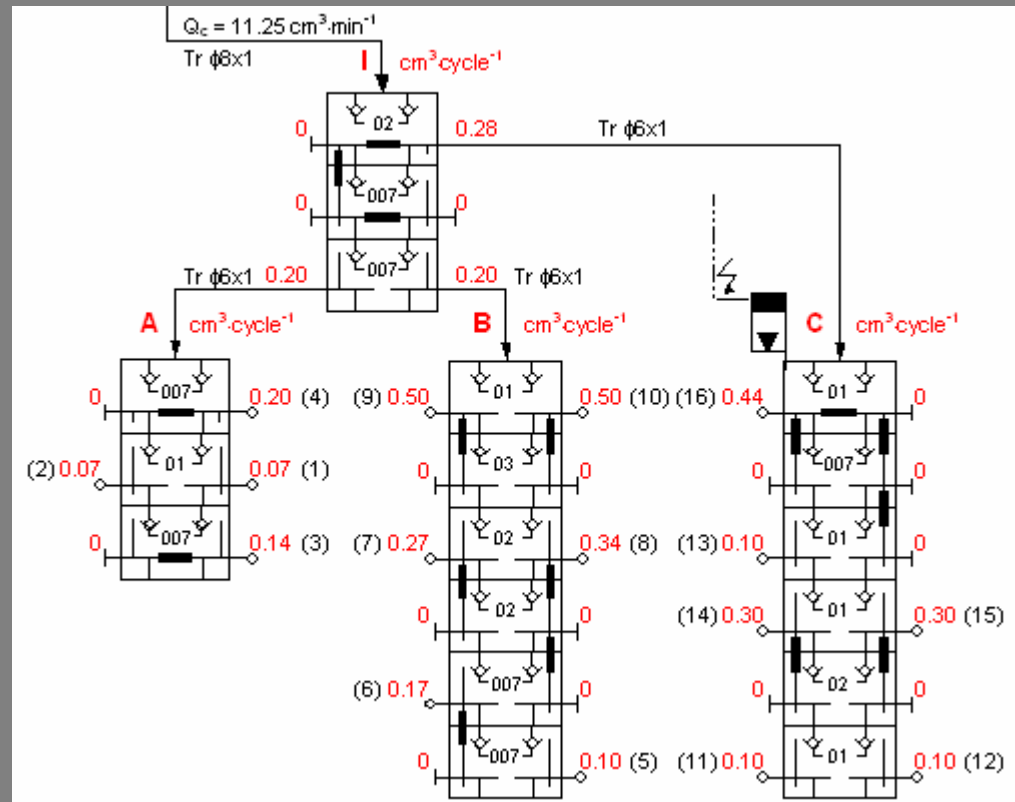
B 6 sekcí, 6 vývodů

C 6 sekcí, 6 vývodů

materiál 1 typ

průměr 2 možnosti

délka 2 možnosti



# ■ POSTUP NÁVRHU MAZACÍHO OBVODU

## ■ standardní řešení bez použití programu

- požadavky mazacích míst ( $\text{cm}^3/\text{pracovní cyklus mazacího obvodu}$ )
- určení variant rozdělovačů ZP-A, ZP-B
- stanovení nejmenšího počtu pracovních cyklů vedlejších rozdělovačů
- zaokrouhlení počtu cyklů nahoru [Vepřek, 2008]

lub. point / lub. group	distributor	lubricant volume ( $\text{cm}^3$ )						number of cycle (-)		
		requirement		program/calculation				min.		real
		w. period		cycle		min. cycle		LP	round	calculation and rounding
		LP	$\Sigma$	LP	$\Sigma$	LP	$\Sigma$			
1 2 3 4	A	0.70 0.80 1.50 2.00	5.00	0.07 0.07 0.14 0.20	0.48	0.84 0.84 1.68 2.40	5.76	10.00 11.43 10.71 10.00	12	> 12
5 6 7 8 9 10	B	0.30 0.50 0.70 0.90 1.30 1.30	5.00	0.10 0.17 0.27 0.34 0.50 0.50	1.88	0.30 0.51 0.81 1.02 1.50 1.50	5.64	3.00 2.94 2.59 2.65 2.60 2.60	3	> 3
11 12 13 14 15 16	C	0.50 0.50 0.50 1.60 1.60 2.40	7.10	0.10 0.10 0.10 0.30 0.30 0.44	1.34	0.60 0.60 0.60 1.80 1.80 2.64	8.04	5.00 5.00 5.00 5.33 5.33 5.45	6	(8.12/8.04) * 6 = 6.06 ↓ 7
A B C	I	5.00 5.00 7.10	17.10	0.20 0.20 0.28	0.68	5.80 5.80 8.12	19.72	28.80 28.20 28.71	29	> 29

# ■ PUBLIKAČNÍ ČINNOST

- odborné časopisy, konference

---

## publikace za rok 2008

[1] Design of Progressive Distributors in Centralized Lubrication Systems by Genetic Algorithms. Jiří Vepřek. *Hydraulika i Pneumatyka*. Wrocław. 2008. Poland. (potvrzeno)

[2] Determining Genetic Algorithm Operators in the Program for Optimisation of Progressive Distributors. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Soft Computing Applied in Computer and Economic Environment*. Kunovice, 2008. Jiří Vepřek.

## připravované publikace

[3] Numerical Simulation of Grease Flow in Lines of Lubrication Systems.

[4] Design of Centralized Lubrication Systems with Progressive Distributors by Genetic Algorithms.

- Dokončení tvorby numerického modelu  
*tok plastického maziva v trubicích mazacího obvodu*
- Experimentální stanovení rychlosti zvuku  
v plastickém mazivu
- Tvorba optimalizačního programu  
*optimalizace mazacích obvodů s progresivními rozdělovači  
pomocí GA*
- Publikace