



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

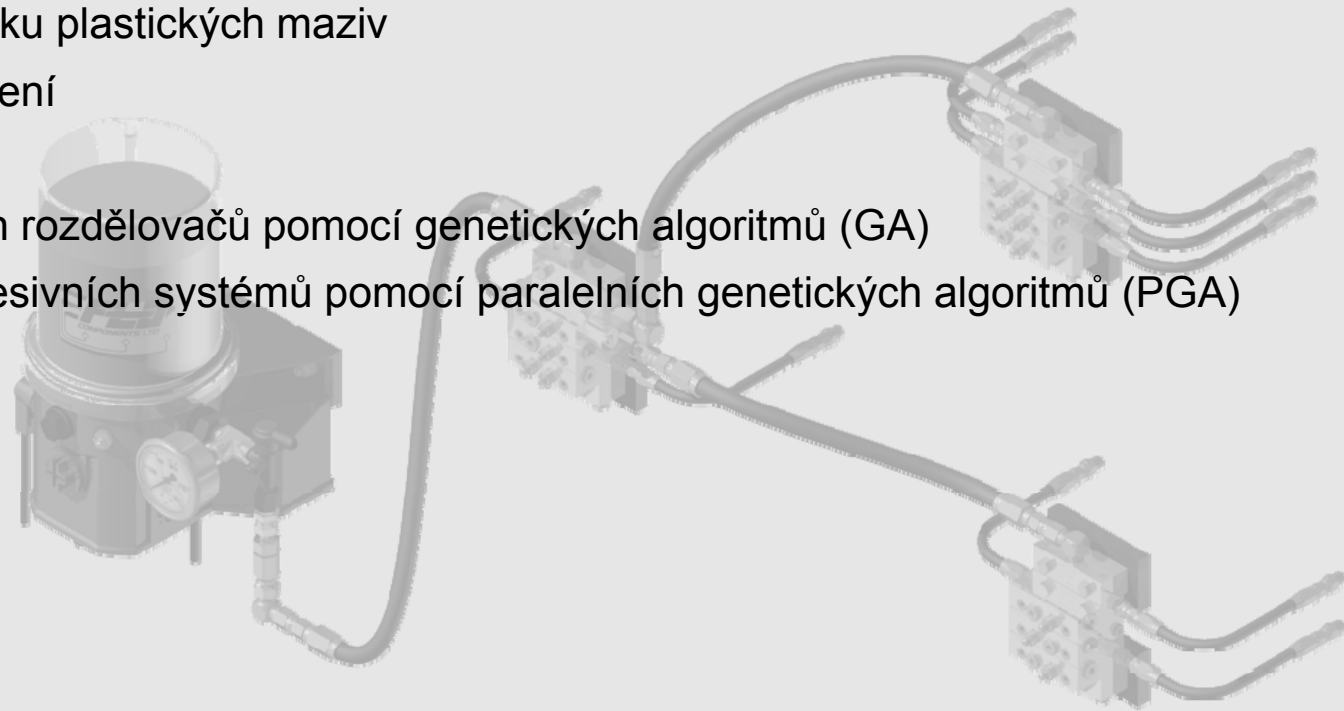
Ing. Jiří Vepřek

 **ústav
konstruování**

Ústav konstruování – Odbor metodika konstruování
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

Obhajoba dizertační práce
28. června 2010, Brno

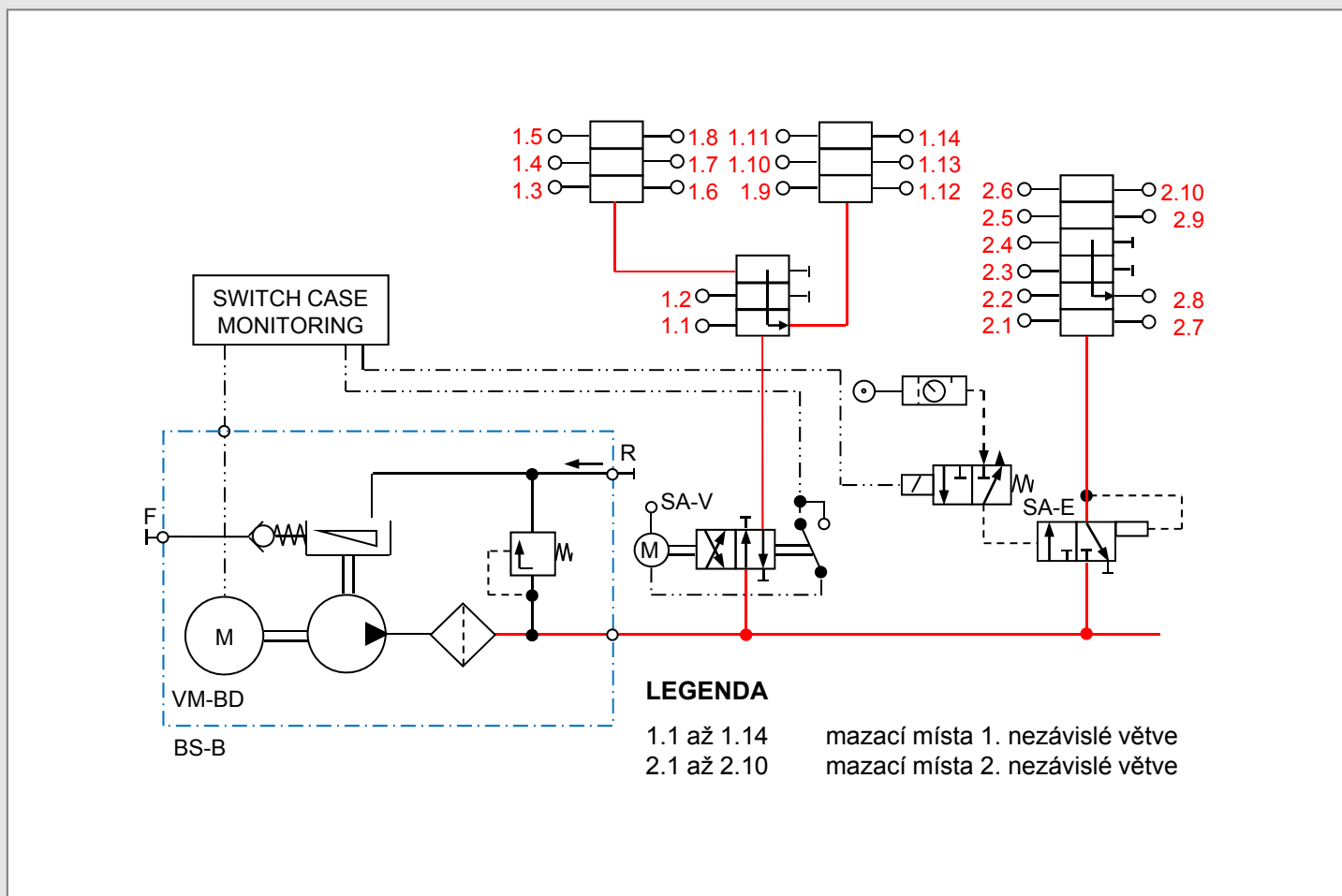
- Úvod
- Cíle dizertační práce
- Teoretické řešení toku plastických maziv
- Experimentální měření
- Simulace
- Návrh progresivních rozdělovačů pomocí genetických algoritmů (GA)
- Optimalizace progresivních systémů pomocí paralelních genetických algoritmů (PGA)
- Závěr



Progresivní mazací systémy

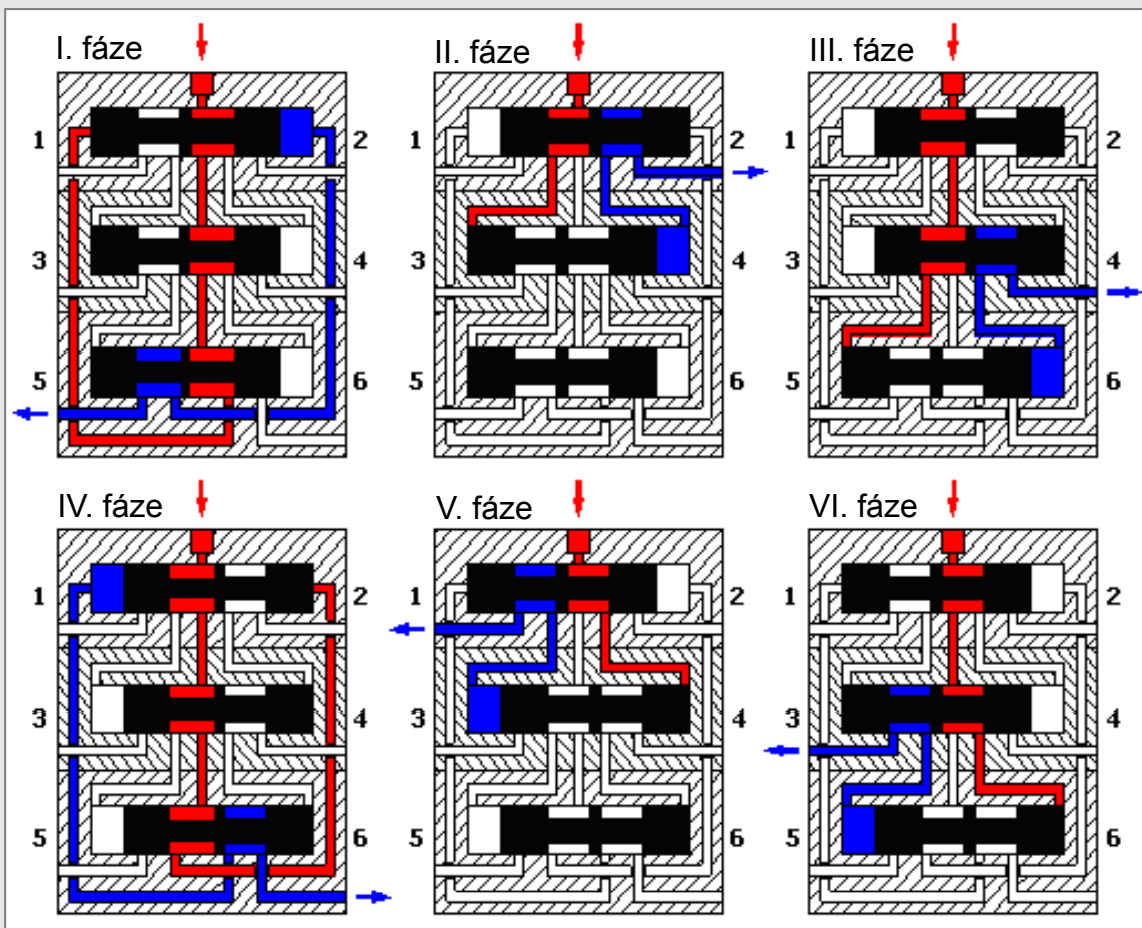
Progresivní mazací systémy, dále jen **progresivní systémy**, jsou centrální mazací systémy s progresivními rozdělovači, které slouží k mazání strojů a zařízení do cca 100 míst. Skupiny mazacích míst mohou být vůči sobě vzdáleny až desítky metrů. Tyto systémy lze použít k dopravě oleje nebo plastického maziva do tlaků 40 MPa. Vhodným uspořádáním mazacího obvodu a volbou rozdělovačů docílíme požadovanou dodávku maziva do všech mazacích míst. Progresivní systémy jsou:

- provozně spolehlivé
- odolné proti mechanickému poškození a vlivům prostředí
- kontrolovatelné z hlediska dodávky maziva do mazacích míst
- těžko upravitelné bez montáže
- mobilní a stacionární
- systémy s ručními, elektrickými nebo pneumaticky ovládanými mazacími přístroji
- systémy ztrátového mazání
- systémy s jedinou větvenou strukturou nebo více strukturami

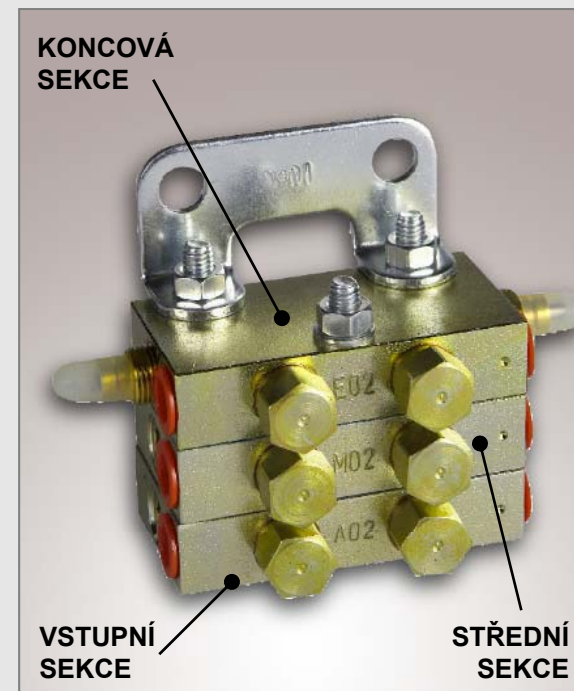


■ **Obr. 1**, Progresivní systém s jedním hlavním a třemi vedlejšími rozdělovači – dvě nezávislé větvené struktury samostatně připojitelné (odpojitelné) od hlavního potrubí

Úvod



■ Obr. 2, Princip progresivních rozdělovačů, řez progresivním rozdělovačem ZP-A se třemi sekcemi (Delimon)

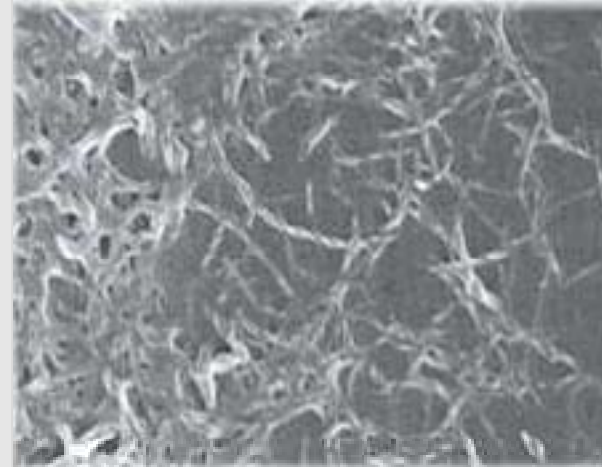


■ Obr. 3, Progresivní rozdělovač ZP-A se třemi sekcemi (Delimon)

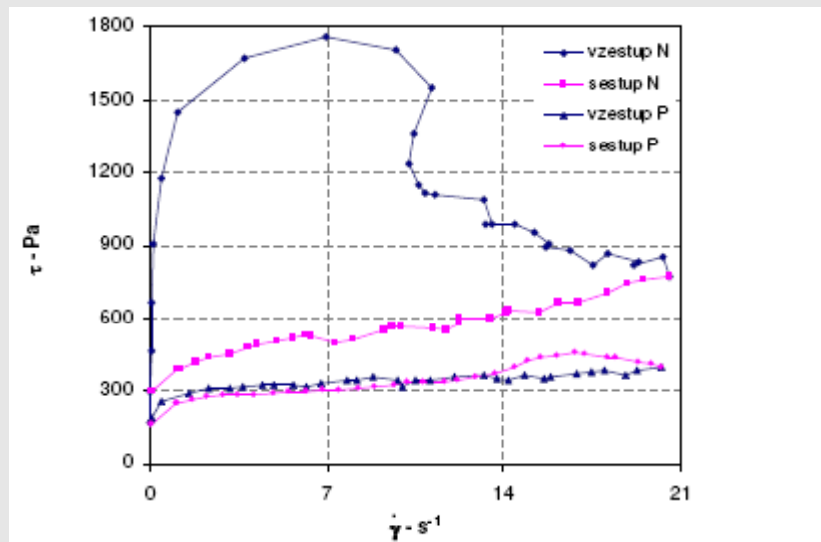
Plastická maziva

Plastická maziva jsou koloidní soustavy. Spojitou fází tvoří mazací olej a rozptýlenou fází zpevňovadlo. Mazací olej je ropného původu, u ekologických maziv syntetického nebo rostlinného původu. Složení plastických maziv je následující:

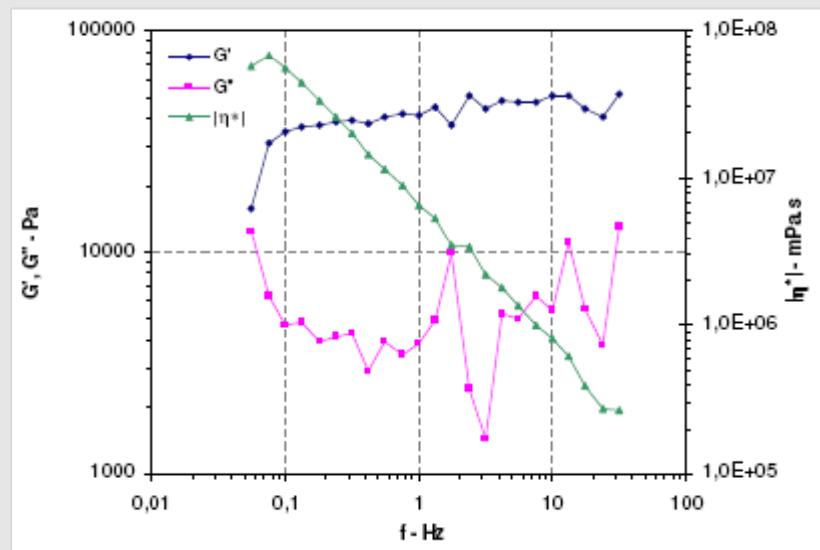
- Kapalná složka 70-90 %
- Zpevňovadlo 5-30 % (kovy lithia, sodíku, vápníku a hliníku)
- Zušlechťující přísady 0,5-5 % (antioxidanty, antikoroďanty, vysokotlaké přísady)
- Klasifikace plastických maziv dle normy ISO 6743/9
- Konzistence plastických maziv (od velmi měkké až po velmi tuhou)



■ Obr. 4, Tvar vláken lithného plastického maziva pod skenovacím mikroskopem SEM ve zvětšení 30 000 x



■ **Obr. 5**, Tokové křivky ekologického plastického maziva Plantogel 2S, $t = 20,0-20,1^{\circ}C$, N – neprohněteno, P – prohněteno



■ **Obr. 6**, Viskoelastické charakteristiky ekologického plastického maziva Plantogel 2S; závislost paměťového modulu G' , ztrátového modulu G'' a komplexní viskozity $|\eta^*|$ na frekvenci oscilačních změn napětí

Cíle dizertační práce

- Vývoj softwarových programů určených k návrhu konstrukce progresivních rozdělovačů a progresivních systémů
- Teoretické odvození a početní (numerické) řešení toku plastických maziv v časovém prostoru, jako visko-plastických látek
- Experimentálně-početní stanovení konstant plastického maziva Plantogel 2S s využitím metody přenosových matic aplikované na newtonské kapaliny
- Analýza možností užití metody přenosových matic k řešení toku plastických maziv, jako visko-plastických látek
- Početní (numerické) řešení neustáleného toku plastických maziv, jako visko-elasticko-plastických látek



■ Obr. 7, Mazací přístroj ACF (Tribotec)

Teoretické řešení toku plastických maziv

Tok visko-plastické binghamské kapaliny

■ Pohybová rovnice

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\phi z}}{\partial \phi} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (1)$$

kde: $dP/dr = 0$, $dP/d\phi = 0$, $g_z = 0$

■ Binghamův konstitutivní vztah

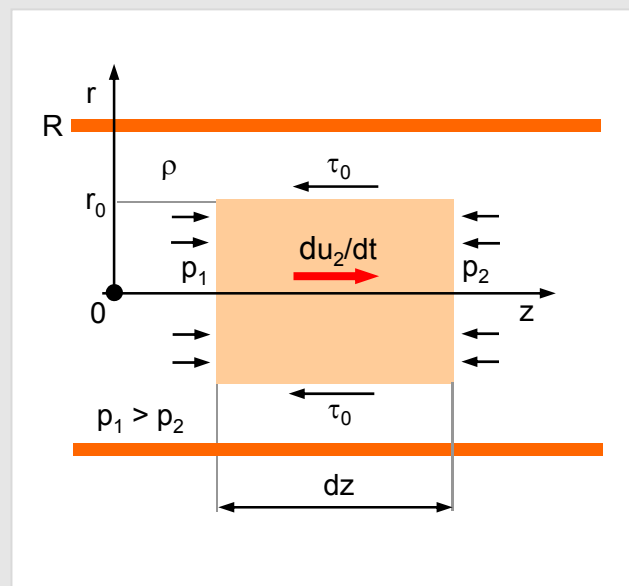
$$\tau_{rz} = \tau_0 + \eta_B \cdot \left(-\frac{du}{dr} \right) \quad (2)$$

platí pro: $du/dr > 0$

■ Pohybová rovnice pístové části

$$\tau_0 = -\frac{1}{2} r_0 \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial u_{s2}}{\partial t} \rho r_0 \quad (3)$$

platí pro: $u_{s2} > 0$



■ Obr. 8, Silové poměry na pístovém elementu binghamské kapaliny v trubici kruhového průřezu

Teoretické řešení toku plastických maziv

Tok visko-plastické binghamské kapaliny

■ Výsledná pohybová rovnice

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \frac{1}{\rho k_c} \frac{\partial P}{\partial z} \beta + \left[\frac{8\tau_0}{3\rho k_c u_s} \delta + \frac{8R^2 \eta_B}{\rho k_c} \right] u_s = 0 \quad (4)$$

platí pro: $u_s > 0 \rightarrow \beta > 0, \delta > 0, k_c > 0$

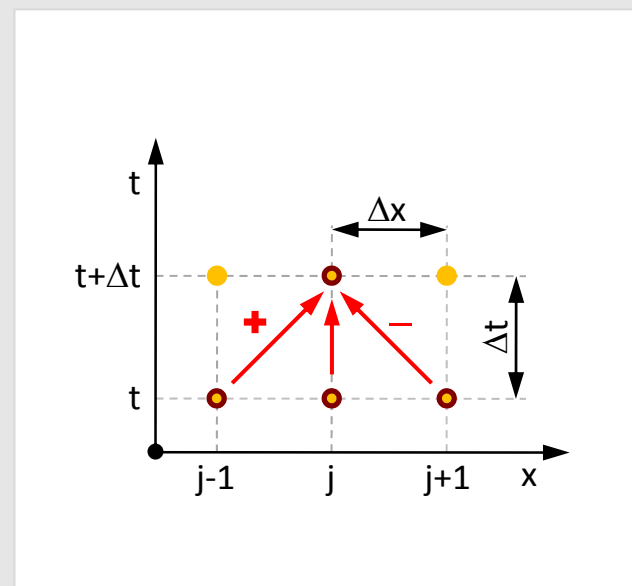
■ Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial P}{\partial t} + k \frac{\partial u_s}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

kde: $u_s > 0$

■ Schéma numerické metody Lax-Wendroff

$$f_{x_j}^{t+\Delta t} = f_{x_j}^t + \Delta t \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{x_j} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \Big|_{x_j} \quad (6)$$



■ Obr. 9, Schéma numerické metody Lax-Wendroff, krok řešení vnitřního uzlu

Teoretické řešení toku plastických maziv

Rychlost zvuku v plastickém mazivu Plantogel 2S

- Linearizovaná rovnice silové rovnováhy

$$\rho \frac{dQ}{dt} + bQ + S \frac{\partial p}{\partial x} = \rho S g \quad (11)$$

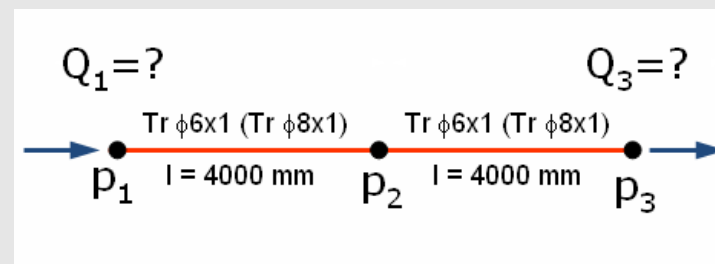
- Linearizovaná rovnice kontinuity

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{S}{K} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

- Přenosová matice soustavy

$$\mathbf{P}_T = \begin{bmatrix} ch(\lambda x) & -\frac{\gamma}{\lambda} sh(\lambda x) \\ -\frac{\mu}{\lambda} sh(\lambda x) & ch(\lambda x) \end{bmatrix} \quad (13)$$

platí pro newtonskou kapalinu, tok v trubici kruh. průřezu



- Obr. 11, Experimentálně měřené veličiny, tlak na začátku, uprostřed a na konci trubice

Teoretické řešení toku plastických maziv

Rychlost zvuku v plastickém mazivu

Postup určení rychlosti zvuku v plastickém mazivu je na základě metody přenosových matic následující:

- časový záznam tlaků p_1 , p_2 a p_3 v trubici
- Fourierova transformace ustálených periodických průběhů p_1 , p_2 a p_3 (program Parametr)
- stanovení konstant přenosové matice (program F-A char)

$$\mathbf{u}(l,s) = \begin{pmatrix} q(l,s) \\ \sigma(l,s) \end{pmatrix} = \mathbf{P}_T(l,s) \cdot \begin{pmatrix} q_0(s) \\ \sigma_0(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(l,s) & P_{12}(l,s) \\ P_{21}(l,s) & P_{22}(l,s) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_0(s) \\ \sigma_0(s) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Určení přenosové matice binghamské kapaliny je možné, za určitých předpokladů, provést pomocí vztahu pro nestacionární tok v trubici

$$v(r,t) = \frac{1}{4} \frac{(-4a + 4r)\tau_0}{\mu} + \frac{1}{4} \frac{(r^2 - a^2) \frac{d}{dz} P(z)}{\mu} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{\alpha_n r}{a}\right) \left(2 \left(\frac{d}{dz} P(z) \right) a + \pi \tau_0 \alpha_n H_0(\alpha_n) \right) e^{-\frac{\alpha_n^2 \mu t}{\rho a^2}}}{\mu J_1(\alpha_n) \alpha_n^3} \quad (15)$$

Cíl

Stanovení tlakových ztrát v potrubí s plastickým mazivem Plantogel 2S a zejména určení rychlosti zvuku v tomto mazivu.

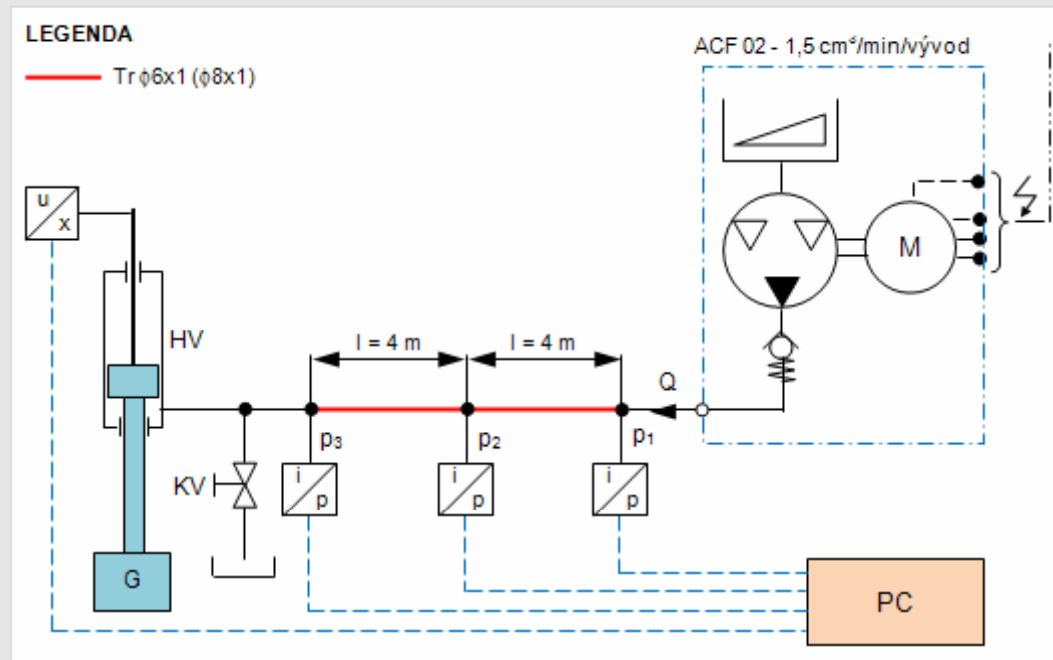
Podmínky měření

Měření s trubicemi $\phi 6 \times 1-4000$ mm a $\phi 8 \times 1-4000$ mm. Tlak na výstupu z trubic je 1,5 až 6 MPa, perioda průtoku je cca $T = 2,9$ s. Střední hodnota průtoku $Q = 5,27 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a teplota $t = 25,2^\circ\text{C}$.

Postup měření

- nastavení polohy pístu hydraulického válce (HV) v dolní úvrati a jeho zatížení
- spuštění časového záznamu veličin
- zapnutí mazacího přístroje
- dosažení horní úvratě pístu hydraulického válce (HV)
- vypnutí mazacího přístroje
- uložení naměřených dat a příprava dalšího měření

Experimentální měření

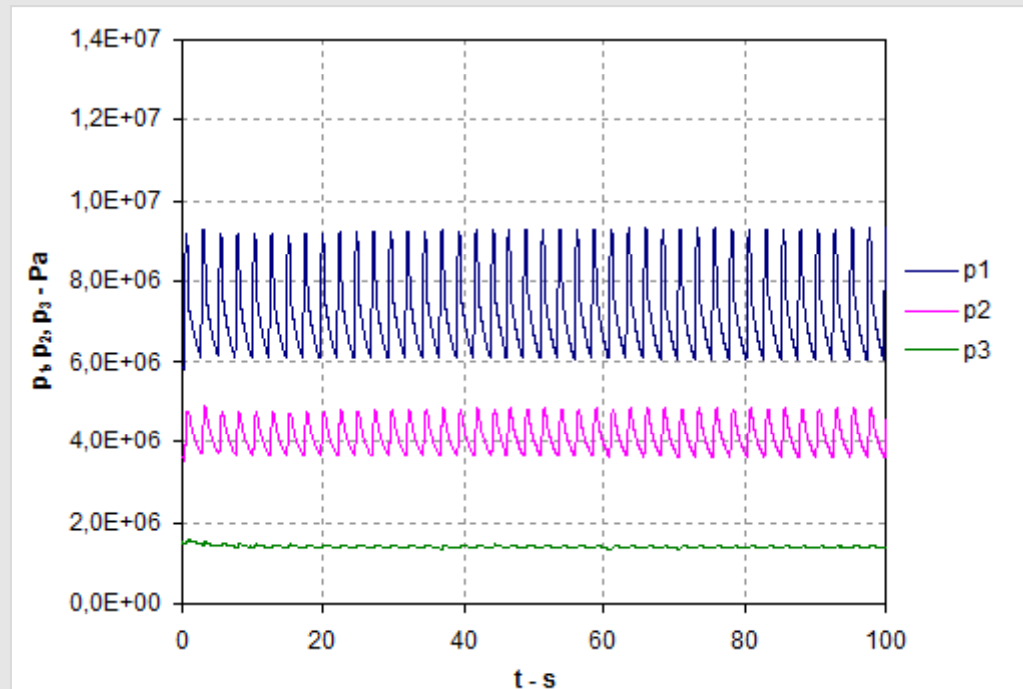


- **Obr. 12**, Schéma experimentálního zařízení (HV – hydraulický válec se snímačem polohy, G – zátěž na pístnici, p_1 - p_3 – snímače tlaku, ACF 02 – mazací přístroj (Tribotec), KV – kulový ventil, Tr 6x1 a Tr 8x1 jsou pozinkované experimentální trubky



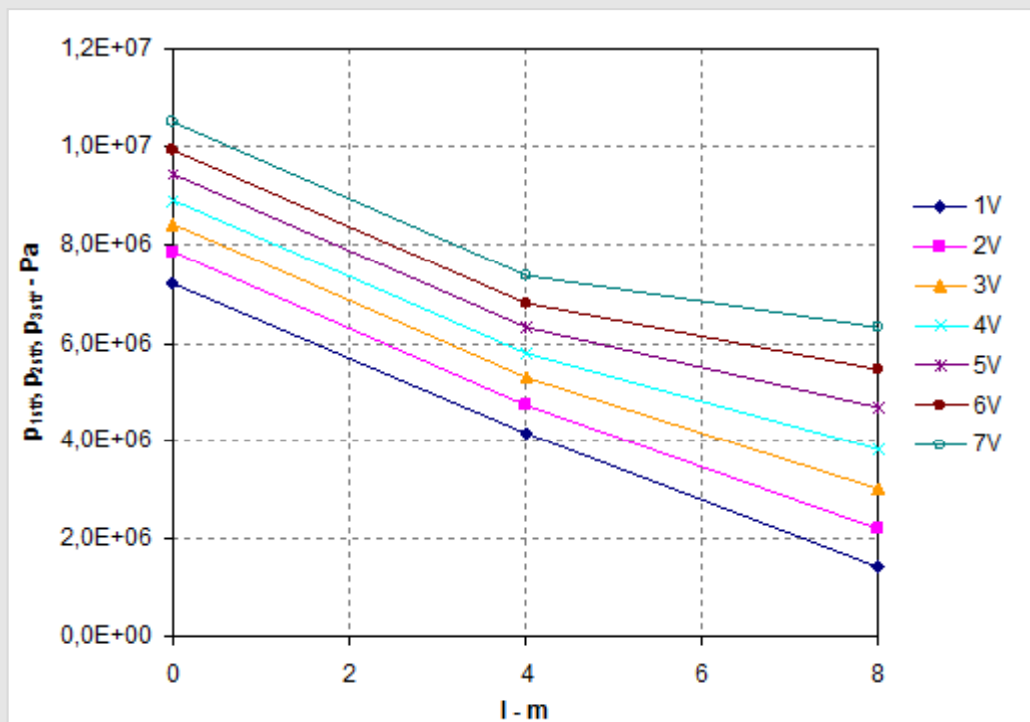
- **Obr. 13**, hydraulický válec (HV), Tribologická laboratoř

Experimentální měření



■ Obr. 14, Tlaky p_1 , p_2 a p_3 měřené na vstupu, uprostřed a na konci trubice; tok ekologického plastického maziva Plantogel 2S, ocelové trubice $\phi 6 \times 1-4000$ mm, teplota $t = 25,2$ °C, soubor RV 111 V

Experimentální měření

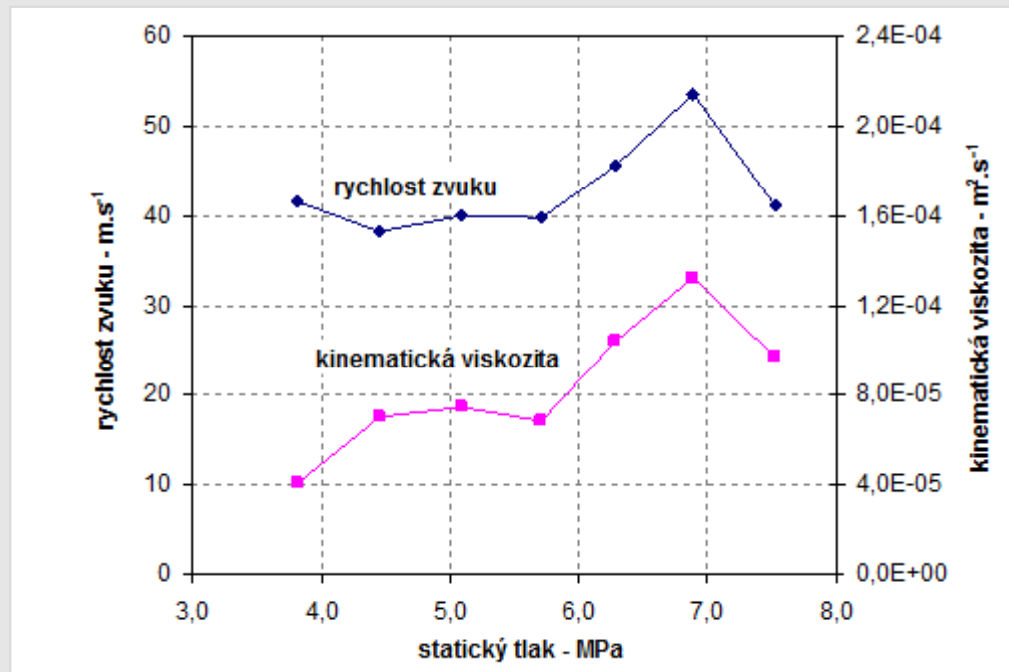


■ **Obr. 15**, Střední hodnoty ustáleného periodického průběhu tlaků p_1 , p_2 a p_3 na vstupu, uprostřed a na konci trubíc Tr $\phi 6 \times 1-4000$ pro zátěž 1-7 na měřicím přípravku, vzestupný nárůst zátěže, soubory RV 111 V až RV 111 VS

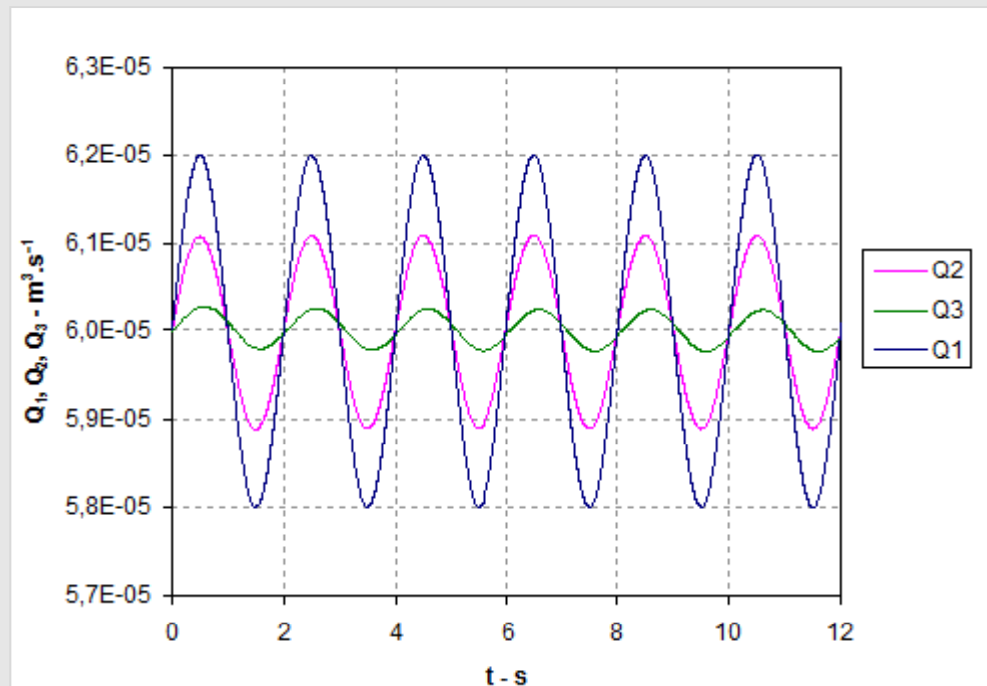
Simulace

Na základě uvedených matematických vztahů, výsledků experimentálního a reometrického měření ekologického plastického maziva **Plantogel 2S** byly provedeny následující analytické a numerické výpočty:

- Určení rychlosti zvuku v mazivu Plantogel 2S.
- Simulace toku maziva Plantogel 2S jako stlačitelné visko-plastické kapaliny
- Simulace toku plastického maziva Plantogel 2S jako elasticko-visko-plastické kapaliny

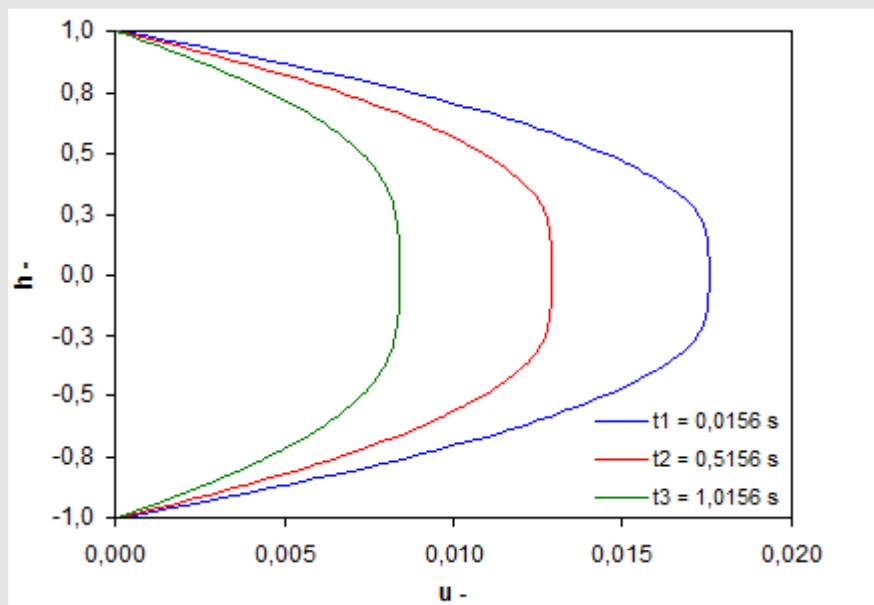


■ Obr. 16, Rychlost zvuku v plastickém mazivu Plantogel 2S a kinematická viskozita v závislosti na středních hodnotách tlaků na vstupu do trubici, mezi nimi a na jejich konci. Trubice 2 x Tr $\phi 6 \times 1-4000$ mm

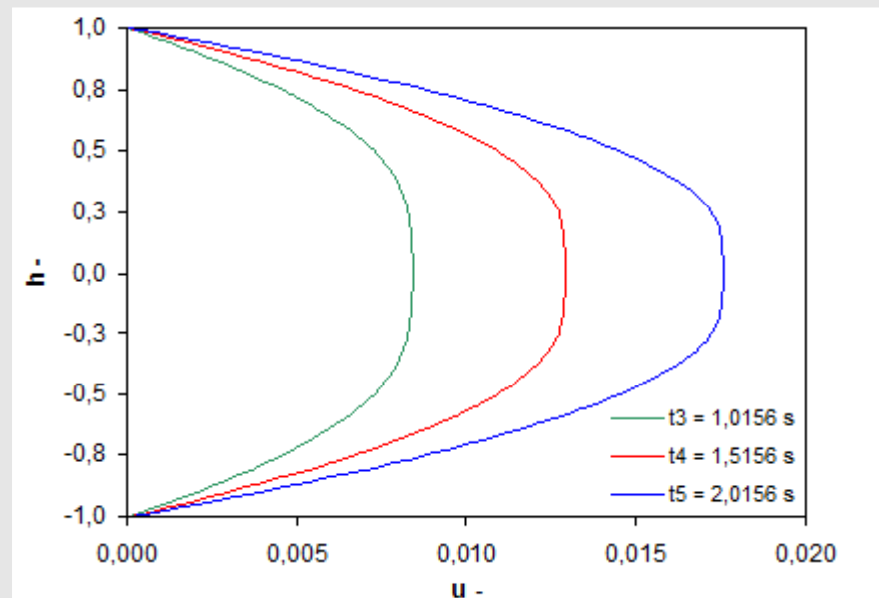


■ **Obr. 17**, Časové průběhy simulovaných průtoků Q_1 na vstupu, Q_2 uprostřed a Q_3 na konci trubice; okrajové podmínky: průtok na vstupu do trubice – funkce sinus (amplituda $Q_A = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, posunutí $Q_p = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, perioda $T = 2 \text{ s}$) a tlak na výstupu z trubice je konstantní ($p = 100 \text{ kPa}$)

Simulace



■ **Obr. 18**, Simulace neustáleného toku visko-elasticko-plastické kapaliny mezi rovnoběžnými deskami; bezrozměrný rychlostní profil kapaliny; konstanty numerické simulace: $\tau_0 = 297$ Pa, $\eta_B = 4,7$ Pa.s, $G = 2600$ Pa, $\omega = 3,14$ rad.s⁻¹, $h = 0,008$ m, $\lambda_1 = 0,002$ s, $\rho = 900$ kg.m⁻³, pokles tlakového spádu během periody tlakového buzení



■ **Obr. 19**, Simulace neustáleného toku visko-elasticko-plastické kapaliny mezi rovnoběžnými deskami; bezrozměrný rychlostní profil kapaliny; konstanty numerické simulace: $\tau_0 = 297$ Pa, $\eta_B = 4,7$ Pa.s, $G = 2600$ Pa, $\omega = 3,14$ rad.s⁻¹, $h = 0,008$ m, $\lambda_1 = 0,002$ s, $\rho = 900$ kg.m⁻³, vzestup tlakového spádu během periody tlakového buzení

Návrh konstrukce progresivních rozdělovačů

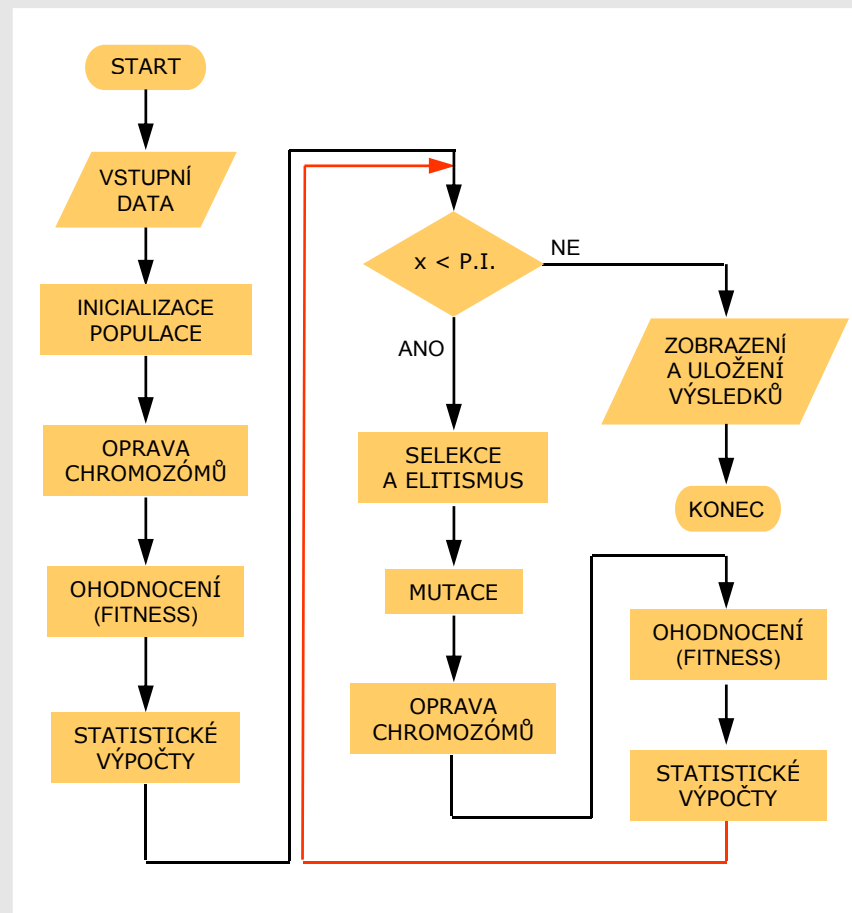
Algoritmus programu

K návrhu progresivních rozdělovačů byl v OO platformě JAVA vytvořen program, ve kterém je implementován GA. Program slouží k nalezení nejvhodnějších konstrukcí rozdělovačů ZP-A až ZP-D na základě vstupních požadavků:

- typ sekcí
- počet sekcí
- počet otevřených vývodů rozdělovače
- poměr dělení maziva v rozdělovači
- parametry GA

Po úpravě je možné tento program použít k návrhu jiných typů rozdělovačů

Pozn. OO znamená objektivě orientována



■ Obr. 20, Vývojový diagram návrhového programu

Návrh konstrukce progresivních rozdělovačů

Zakódování progresivních rozdělovačů

Celočíselné kódování je vhodný způsob, jak interpretovat nezbytné a dostačující informace o konstrukčním provedení progresivních rozdělovačů.

■ **Tab. 1,** Chromozóm n-sekčního progresivního rozdělovače ZP-A až ZP-D

sekce	1. sekce						...	i-tá sekce						...	n-tá sekce					
gen	A _S	B _S	C _S	D _S	E _S	F _S		A _S	B _S	C _S	D _S	E _S	F _S		A _S	B _S	C _S	D _S	E _S	F _S

■ **Tab. 2,** Význam genů v chromozómech progresivních rozdělovačů ZP-A až ZP-D

pořadí genů v řetězci	gen	význam genů
1	A _S	velikost sekce [$\text{cm}^3 \cdot \text{zdvih}^{-1}$]
2	B _S	spojení vývodů sekce (1 = ANO, 0 = NE)
3	C _S	spojení levých průběžných kanálů sekcí (1 = ANO, 0 = NE)
4	D _S	spojení pravých průběžných kanálů sekcí (1 = ANO, 0 = NE)
5	E _S	otevření (uzavření) levého vývodu sekce (1 = ANO, 0 = NE)
6	F _S	otevření (uzavření) pravého vývodu sekce (1 = ANO, 0 = NE)

Pozn. Velikosti sekcí progresivního rozdělovače ZP-A: 0.07, 0.1, 0.2 a 0.3 $\text{cm}^3 \cdot \text{zdvih}^{-1}$

Návrh konstrukce progresivních rozdělovačů

Výpočet objemového toku maziva v rozdělovačích

Na základě zavedeného systému veličin, viz obr. 21, tj. objemů vstupujících (vystupujících) ze sekcí rozdělovačů ZP-A až ZP-D, byly získány výpočtové vztahy. Jedná se o množství maziva vytlačené za jeden pracovní cyklus rozdělovače, tj. $[\text{cm}^3 \cdot \text{cyklus}^{-1}]$

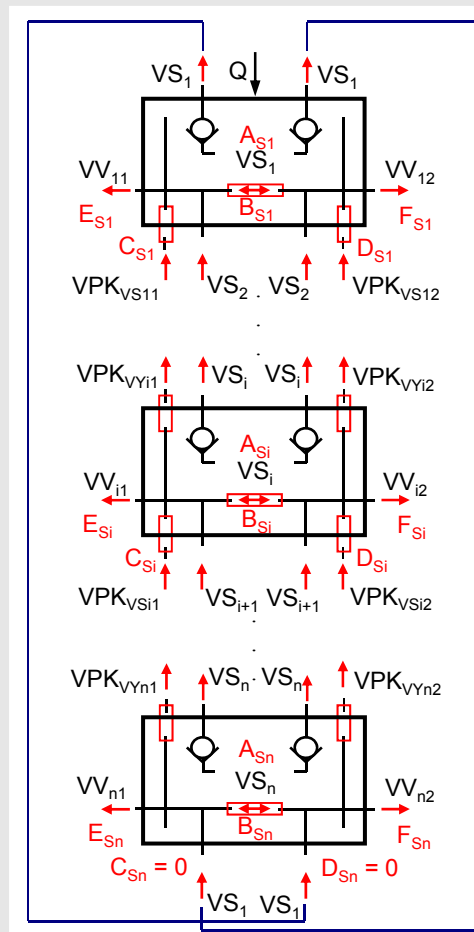
- vytlačený objem (i-tá sekce, levý vývod)

$$VV_{i1} = E_{Si} [VS_{i+1} (1 + B_{Si}) + C_{Si} VPK_{VS_{i1}} + B_{Si} D_{Si} VPK_{VS_{i2}}] \quad (16)$$

- vytlačený objem (i-tá sekce, pravý vývod)

$$VV_{i2} = E_{Si} [VS_{i+1} (1 + B_{Si}) + D_{Si} VPK_{VS_{i2}} + B_{Si} C_{Si} VPK_{VS_{i1}}] \quad (17)$$

Pozn. Symboly A_{Si} , B_{Si} , C_{Si} , D_{Si} , E_{Si} a F_{Si} označují geny chromozómu i-té sekce rozdělovače ZP-A.



■ **Obr. 21,**
Tok maziva
sekcemi
progresivních
rozdělovačů
ZP-A až ZP-D

Návrh konstrukce progresivních rozdělovačů

Hodnotící funkce (fitness)

V programu, který byl vytvořen k návrhu progresivních rozdělovačů ZP-A až ZP-D byla navržena hodnotící funkce fitness ve tvaru

$$HF_i = \sum_{j=1}^{m-1} \text{abs} \left(\frac{VV_{i,j+1}}{VV_{ij}} - \frac{VP_{i,j+1}}{VP_{ij}} \right) \quad (18)$$

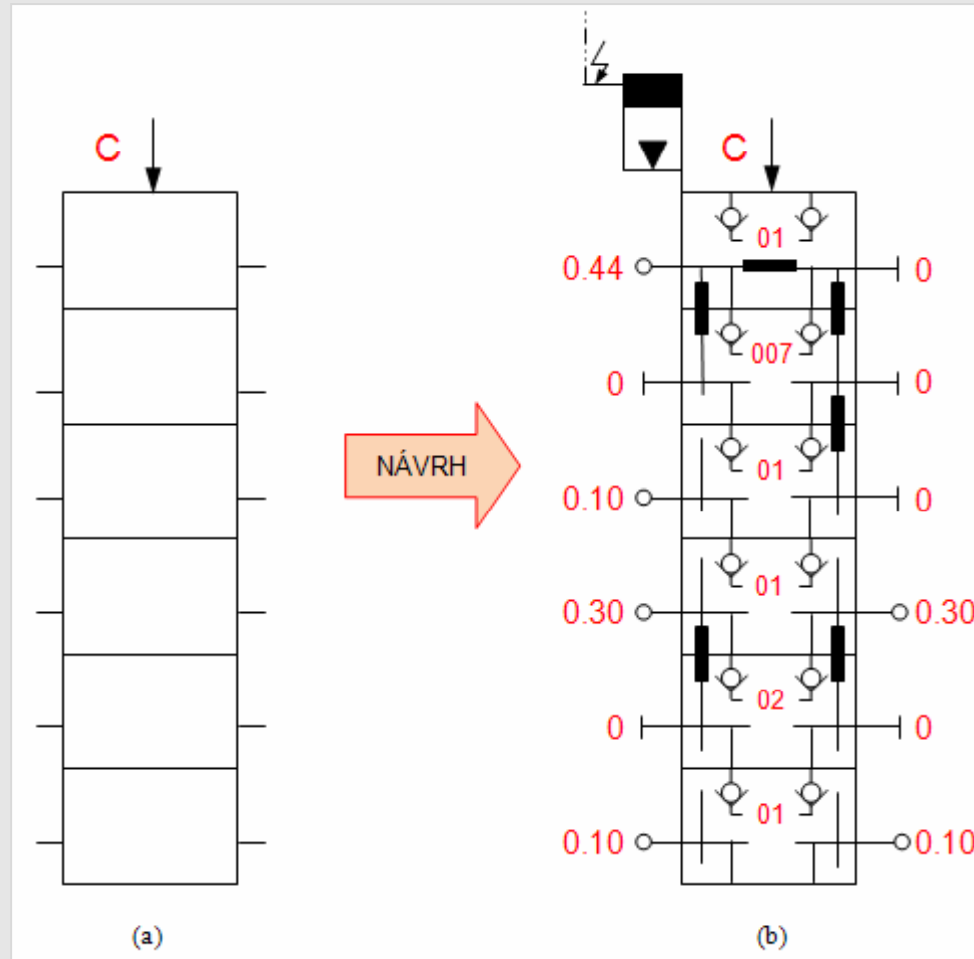
kde: VP_{ij} , $VP_{i,j+1}$ – požadované objem maziva [$\text{cm}^3 \cdot \text{cyklus}^{-1}$], VV_{ij} , $VV_{i,j+1}$ – vypočítané objemy maziva [$\text{cm}^3 \cdot \text{cyklus}^{-1}$], m – počet otevřených vývodů rozdělovače

Optimalizace progresivního rozdělovače ZP-A

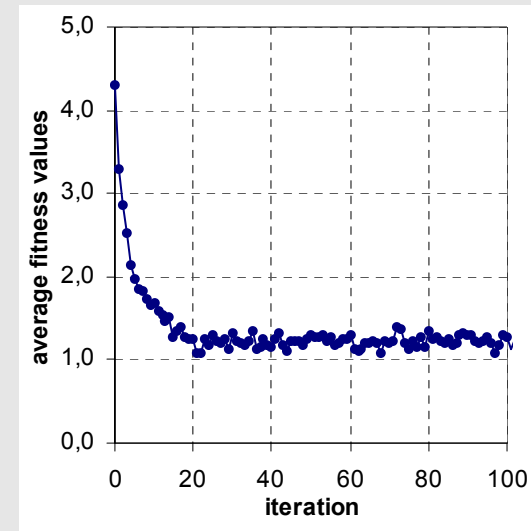
Pomocí programu byl proveden návrh progresivního rozdělovače pro tyto požadavky:

- typ rozdělovače: ZP-A
- počet sekcí: 6
- počet otevřených vývodů: 6
- poměr dělení maziva: 0,5:0,5:0,5:1,6:1,6:2,4
- parametry GA: populace $N = 500$, selekce $t_T = 3$, mutace $P_m = 1/30$, iterace $PI = 200$

Návrh konstrukce progresivních rozdělovačů



■ Obr. 22, Vývojový diagram návrhového programu



■ Obr. 23, Průměrná hodnota fitness populace

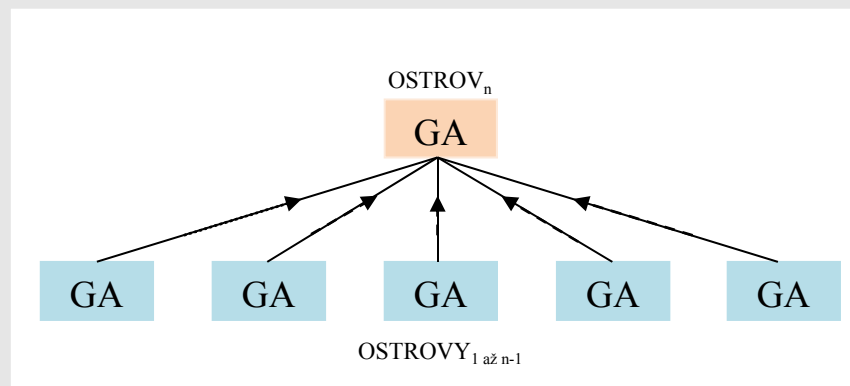
Návrh progresivních systémů

Algoritmus programu

K návrhu progresivních systémů byl v prostředí MATLAB vytvořen program, ve kterém je implementován PGA. Program slouží k nalezení nejvhodnějších variant progresivních systémů dle požadavků:

- Požadavky na progresivní systém
- Parametry mazacího přístroje
- Cyklus mazání
- Požadavky mazacích míst
- Fyzikální vlastnosti maziva
- Parametry potrubí progresivního systému
- Parametry PGA
- Ostatní

Pozn. Označení PGA má význam paralelní genetický algoritmus



■ Obr. 24, Hierarchická struktura programu s implementovaným PGA

Návrh progresivních systémů

Zakódování progresivních systémů

Celočíselné kódování zahrnující jak informace o progresivních rozdělovačích, tak informace o potrubí a hierarchii zapojení mazacího obvodu.

■ Tab. 3, Chromozóm progresivního systému s rozdělovači ZP-A až ZP-D (Delimon)

SKUPINA	PROGRESIVNÍ ROZDĚLOVAČE					POTRUBÍ				
VÝZNAM	hlavní	1-ní vedlejší	.	i-tý vedlejší	.	n-tý vedlejší	materiál	D	I	zapojení
GEN	A _S B _S C _S D _S E _S F _S	A _S B _S C _S D _S E _S F _S	.	A _S B _S C _S D _S E _S F _S	.	A _S B _S C _S D _S E _S F _S	G _{PS}	H _{PS}	I _{PS}	J _{PS}

■ Tab. 4, Význam genů v chromozómech progresivních systémů

GEN	VÝZNAM GENŮ
A _S	velikost sekcí ZP-A a ZP-C (1 → 0.07, 2 → 0.1, 3 → 0.2 a 4 → 0.3 cm ³ .zdvih ⁻¹)
B _S	spojení vývodů – můstek (0 → NE, 1 → ANO)
C _S	spojení průběžných kanálů – levá strana (0 → NE, 1 → ANO)
D _S	spojení průběžných kanálů – pravá strana (0 → NE, 1 → ANO)
E _S	otevření levého vývodu (0 → NE, 1 → ANO)
F _S	otevření pravého vývodu (0 → NE, 1 → ANO)
G _S	materiály potrubí – celá čísla 1 až n (dle jejich počtu)
H _S	průměry potrubí – celá čísla 1 až n (dle jejich počtu)
I _S	délky potrubí – celá čísla 1 až n (dle jejich počtu)
J _S	hierarchie progresivního systému – celá čísla 1 až n (dle jejich počtu)

Hodnotící funkce (fitness)

V programu, který byl vytvořen k návrhu progresivních systémů s rozdělovači ZP-A až ZP-D byla navržena hodnotící funkce fitness ve tvaru

$$HF = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ V_1 H(VV_{ij} - VP_{ij}) + V_2 [1 - H(VV_{ij} - VP_{ij})] \right\} \text{abs}(VV_{ij} - VP_{ij}) \quad (19)$$

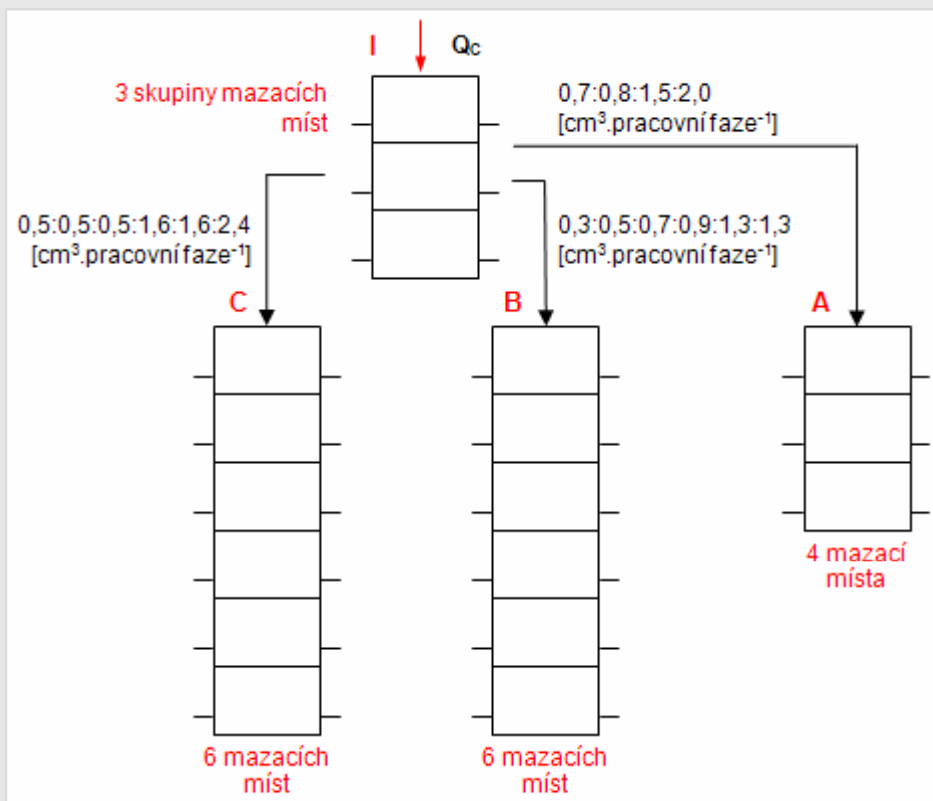
kde: VP_{ij} , – požadované objemy maziva [$\text{cm}^3 \cdot \text{fáze}^{-1}$], VV_{ij} – vypočítané objemy maziva [$\text{cm}^3 \cdot \text{fáze}^{-1}$], n – počet rozdělovačů, m – počet otevřených vývodů

Optimalizace progresivního systému s rozdělovači ZP-A

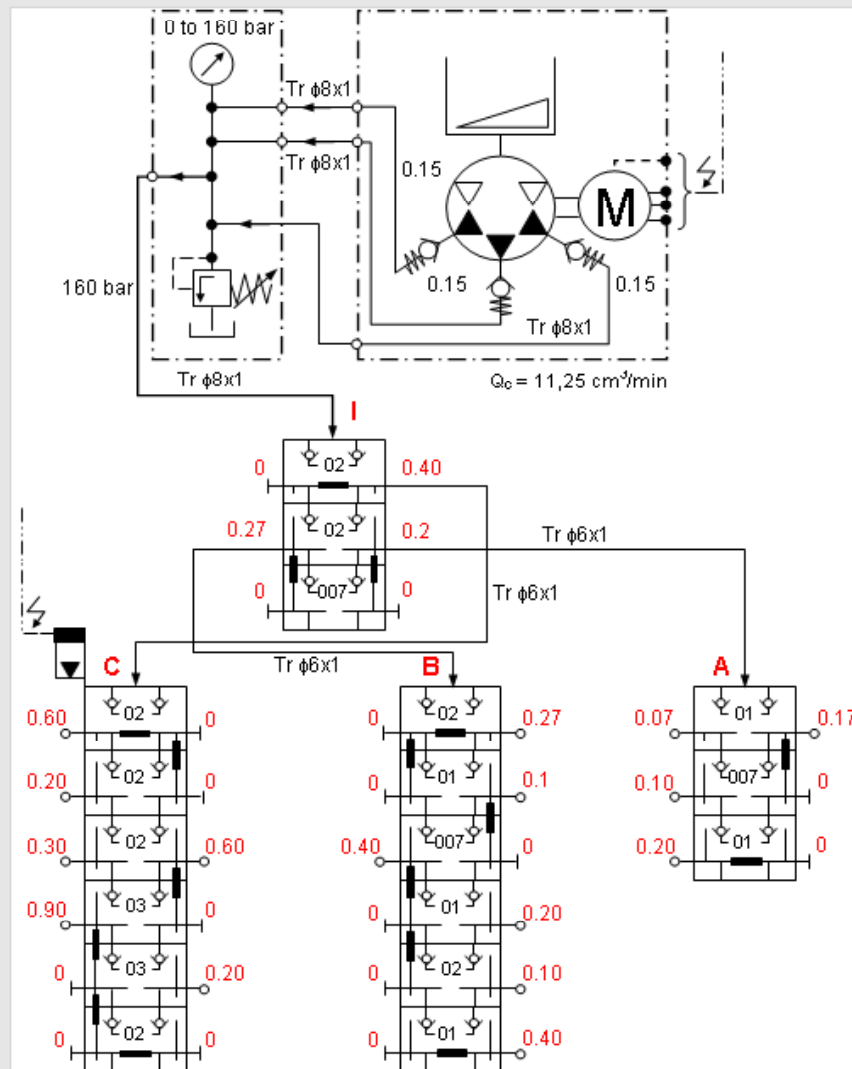
Pomocí programu byl proveden návrh progresivního systému pro tyto požadavky:

- typ rozdělovačů: ZP-A
- počet rozdělovačů: 1 hlavní a 3 vedlejší
- počet sekcí: 3, 6, 6 a 3
- počet mazacích míst: 16
- mazivo: 0.7, 0.8, 1.5, 2.0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.3, 1.3, 0.5, 0.5, 0.5, 1.6, 1.6, 2.4 $\text{cm}^3 \cdot \text{fáze}^{-1}$
- parametry PGA: $N = 50$, $t_T = 2$, $P_m = 1/35$, migrace $P_{MJ} = 5$, $MI = 1$, přemazání 5 %

Návrh progresivních systémů

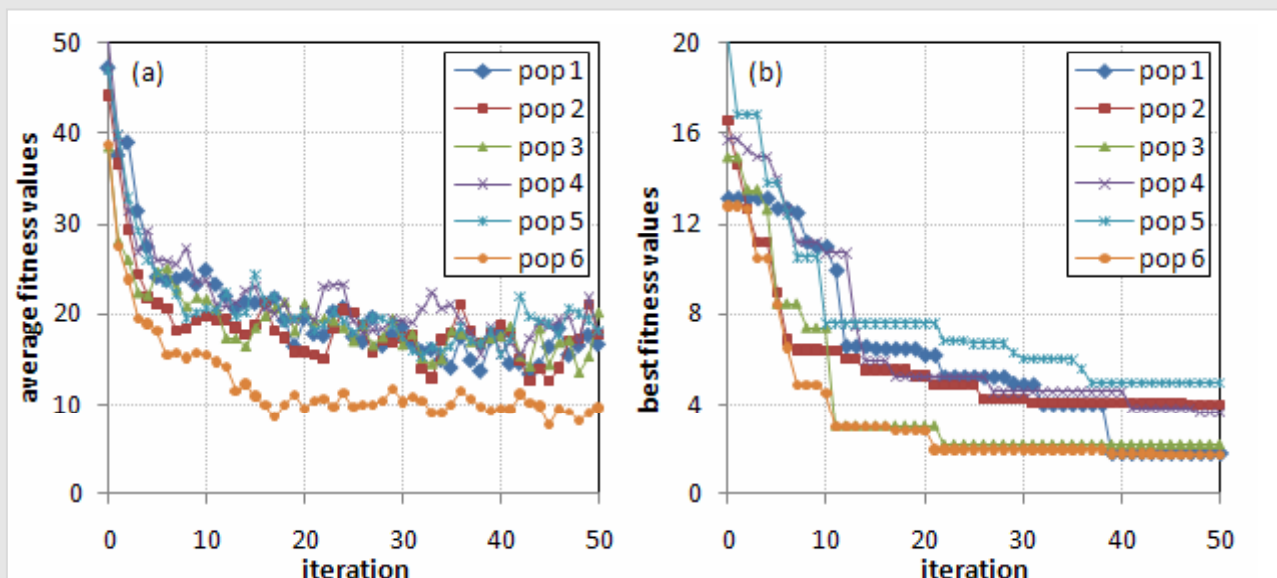


■ Obr. 25, Základní podoba navrhovaného progresivního systému s jedním hlavním a třemi vedlejšími rozdělovači



■ Obr. 26, Výsledný progresivní systém

Návrh progresivních systémů



■ Obr. 27a

■ Obr. 27b

- Obr. 27, Statistická data (populace $N_{di} = N_h = 50$, selekce $t_{Tdi} = t_{Th} = 2$, $P_{mdi} = P_{mh} = 1/35$, iterace $PI = 50$, počet migrujících jedinců $P_{MJ} = 5$, migrační interval $MI = 1$) získaná během výpočtu: (a) průměrná hodnota fitness funkce v dílčích populacích, (b) nejlepší hodnota fitness funkce v dílčích populacích – pop 1-5 jsou dolní dílčí populace, pop. 6 je horní nadřazená populace

Přínos dizertační práce lze shrnout do několika následujících bodů:

- Program určený k návrhu konstrukce rozdělovačů ZP-A až ZP-D je vhodný nástroj k jejich optimalizaci
- Program určený k návrhu progresivních systémů je užitečný pro projekční praxi, neboť umožňuje velmi rychle nalézt nejlepší možná řešení dle zadaných požadavků
- Oba programy jsou příspěvkem k praktické aplikaci GA a PGA v oblasti konstrukce a projektování vysokotlakých hydraulických prvků a systémů
- Poprvé byla stanovena rychlost zvuku v plastickém mazivu Plantogel 2S (NLGI 2) a to pomocí metody přenosových matic uvažujících newtonskou kapalinu
- Odvozeny byly rovnice k numerickému řešení, pomocí metody Lax-Wendroff, toku stlačitelných visko-plastických kapalin
- Odvození přenosové matice visko-plastické binghamské kapaliny je možné na základě vztahu, který byl zde prezentován, a určitých předpokladů
- Program k simulaci toku elasticko-visko-plastických kapalin je užitečný nástroj ke studiu neustáleného toku plastických maziv

Pozn. Citace použité literatury, obrázků a výpočtových vztahů je uvedena v dizertační práci



Děkuji vám za pozornost

Ing. Jiří Vepřek

 **ústav
konstruování**

Ústav konstruování – Odbor metodika konstruování
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

Obhajoba dizertační práce
28. června 2010, Brno