VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Pojednání ke státní doktorské zkoušce

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

12. září 2006, Brno

Doktorand: Ing. Jiří Vepřek
Školitelé: Doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.
Doc. Ing. Pavel Ošmera, CSc.

Obsah

Seznam použitých veličin ... 3

1. Úvod ... 4

2. Mazací systémy s progresivními rozdělovači ... 5
2.1 Úvod ... 5
2.2 Prvky progresivních systémů ... 5
2.2.1 Progresivní rozdělovače ... 6
2.2.2 Mazací přístroje ... 7
2.4 Projektování progresivních systémů ... 8
2.4.1 Požadavky na množství maziva ... 8
2.4.2 Stanovení mazacích dávek ... 8
2.4.3 Tlakové ztráty v progresivním systému ... 9

3. Laminární tok plastických maziv ... 11
3.1 Vlastnosti plastických maziv ... 11
3.2 Reologické modely ... 12
3.3 Rovnice laminárního toku ... 14
3.3.1 Binghamův model ... 14
3.3.2 Herschel-Bulkleyův model ... 15
3.4 Modelování toku plastických maziv ... 16

4. Optimalizace progresivních systémů ... 19
4.1 Cíl optimalizace ... 19
4.2 Optimalizace pomocí genetických algoritmů ... 19

5. Genetické algoritmy ... 20
5.1 Úvod ... 20
5.2 Princip genetických algoritmů ... 20
5.2.1 Obecný tvar genetického algoritmu ... 20
5.2.2 Ohodnocení jedinců a selekce ... 21
5.2.3 Změnové (rekombinační) operátory ... 23
5.3 Varianty genetických algoritmů ... 24

6. Dílčí výsledky ... 25
6.1 Program GenetikaRozdělovač_II ... 25
6.1.1 Zakódování a ohodnocení varianty rozdělovače ZP-A ... 25
6.1.2 Algoritmus programu GenetikaRozdělovač_II ... 27
6.1.3 Výsledky optimalizace rozdělovače ZP-A ... 28
6.2 Tok plastických maziv ... 31
6.2.1 Reogramy ekologických plastických maziv ... 31
6.2.2 Tlakové ztráty ve vedení ... 32
6.2.3 Simulace toku plastických maziv ... 34

7. Cíl disertační práce ... 38

Příloha ... 39

Literatura ... 40
Publikace a spoluautorství ... 43

Seznam použitých veličin

veličina	jednotka	význam
a	$[m \cdot s^{-1}]$	skutečná rychlost zvuku v potrubí
C	$[kg^{-1} \cdot m^4 \cdot s^2]$	hydraulická kapacita
D	$[kg \cdot m^{-4} \cdot s^{-2}]$	odpor proti deformaci
E	[Pa]	objemový modul pružnosti plastického maziva
f	$[s^{-1}]$	frekvence tlakových (průtokových) změn
K	$[Pa \cdot s^n]$	koeficient konzistence
l	[m]	délka potrubí
L	[-]	délka chromozómu (počet bitů v řetězci)
n	[-]	index toku
N	[-]	počet jedinců v populaci
p	[Pa]	tlak
p_z	[Pa]	tlakový spád v potrubí
p_i	[-]	pravděpodobnost výběru i-tého jedince
p_{uc}	[-]	pravděpodobnost výměny genů při jednotném křížení
p_d	[-]	ztráta variability
P_m	[-]	pravděpodobnost mutace
P_x	[-]	pravděpodobnost křížení
Q	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	celkový objemový průtok
Q_1	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	průtok vnitřní části trubice
Q_2	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	průtok okrajovou části trubice
Q_C	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	průtok přes odpor proti deformaci
Q_R	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	průtok přes odpor proti pohybu
r	[m]	poloměr elementu kapaliny
r_0	[m]	poloměr pístové části toku
R	[m]	vnitřní poloměr potrubí
t	[°C]	teplota
t_T	[-]	počet jedinců v turnajové selekci
u	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost kapaliny v potrubí
u_0	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost pístové části toku (maximální rychlost)
v_s	$[m \cdot s^{-1}]$	střední rychlost proudění
γ	[-]	úhel zkosení
$\dot{\gamma}$	$[s^{-1}]$	gradient rychlosti
Δp_C	[Pa]	tlakový spád na odporu proti deformaci
Δp_R	[Pa]	tlakový spád na odporu proti pohybu
η	[Pa·s]	dynamická viskozita
η_B	$[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$	Binghamova viskozita
λ_v	[m]	vlnová délka oscilační změny
τ	[Pa]	smykové napětí
τ_f	[Pa]	počáteční smykové napětí

1. Úvod

Mazání snižuje rychlost opotřebení kontaktních povrchů a tím výrazně ovlivňuje poruchovost a životnost strojů a zařízení. U větších strojních zařízení není z důvodu většího počtu kontaktních míst snadné, aby bylo mazání prováděno ručně. Ruční mazání zvyšuje pravděpodobnost poruch strojního zařízení a nezaručuje optimální dodávku maziva ke všem třecím místům, tzn., že dochází buď k nedostatečné nebo naopak k přebytečné dodávce maziva. K mazání větších strojních zařízení se proto používají centrální mazací systémy, které dávkují mazivo čistě, bezpečně a pravidelně. S jejich pomocí lze docílit snížení opotřebení kontaktních povrchů, zmenšení poruchovosti strojního zařízení a naopak lze zvýšit jeho provozní spolehlivost. Při malém počtu mazaných míst se ovšem centrální mazací systém stává ekonomicky méně výhodným.

Centrální mazací systémy se požívají k mazání mobilních, stacionárních strojů nebo i celé skupiny stacionárních strojů, jako jsou např. výrobní linky. Z hlediska stavby jsou mazací systémy tvořeny zdrojem tlakového maziva, rozvody maziva, zařízením pro dávkování a rozdělování maziva, zařízením pro úpravu maziva, kontrolním a řídicím systémem. Mazivem může být olej nebo plastické mazivo různé konzistence. Centrální mazací systém může pracovat periodicky nebo kontinuálně a to v automatickém nebo ručním režimu při činnosti stroje. Z hlediska vnitřního uspořádání centrálních mazacích systémů rozlišujeme obvody jednopotrubní, dvoupotrubní, vícepotrubní a progresivní. Podrobný popis lze nalézt v různých firemních materiálech, jako např. [Špondr], [Tribotec] apod.

Centrální mazací systémy s progresivními rozdělovači musí zajistit namazání stanovených míst dané strojní soustavy. Návrh mazacího systému musí zabezpečit splnění tohoto požadavku [Nevrlý a Pavlok, 2000] jak co do přivedeného množství, tak co do časového režimu mazacích cyklů. Na základě těchto vstupních informací se stanoví počet progresivních rozdělovačů v systému, jejich vzájemné propojení, konstrukční provedení a pracovní cyklus mazacího obvodu.

Požadavky na vyšší úsporu maziva, spolehlivost dodávky maziva a nízké pořizovací náklady mazacího obvodu vedou k tomu, zda by nebylo možné používanou metodiku projektování určitým způsobem zdokonalit. K tomuto účelu se zdají být vhodné genetické algoritmy [Ošmera, 2001], [Mařík et al., 2001] a [Zelinka, 2002], s jejichž pomocí je možné optimalizovat konstrukční provedení a propojení všech progresivních rozdělovačů v mazacím systému a dosáhnout splnění výše uvedených požadavků.

Nezanedbatelný vliv na přesnost dodávky mají také vlastnosti dopravovaného maziva, zejména modul objemové pružnosti, který je zvláště u plastických maziv ovlivněn vyšším obsahem nerozpuštěného vzduchu a reologické vlastnosti maziva [Czarny, 2004], [Nevrlý a Pavlok, 2000], [Czarny, 1992], [Giesekus, 1994].

2. Mazací systémy s progresivními rozdělovači

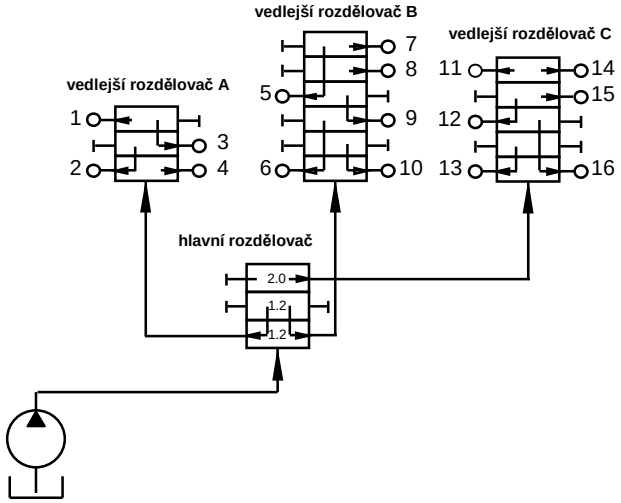
2.1 Úvod

Centrální mazací systémy s progresivními rozdělovači [Špondr], [Tribotec] se používají k mazání malých a středně velkých strojů, např. obráběcích strojů, lisů, děrovacích lisů, stříhacích strojů, dřevoobráběcích strojů apod. Tento typ systému je vhodný k dopravě plastického maziva a oleje. K výhodám tohoto typu mazacího systému patří:

- relativně nízké investiční náklady,
- pouze jediné hlavní zásobovací potrubí,
- relativně nízký tlak v potrubí,
- jednoduché sledování činnosti pomocí indikátoru pohybu na rozdělovačích,
- malé rozměry rozdělovačů.

Nevýhodou těchto systémů je to, že množství maziva dopravené k mazaným místům a počet mazaných míst spojených k systému se relativně těžce mění.

Mazací systémy s progresivními rozdělovači mohou mít nejrůznější podobu od pouhých rozdělovačů, na které je našroubovaná ruční maznice až po složitější systémy, např. s dvěma a více paralelně spojenými trubkami, které je možno pomocí rozváděčů odpojit. Tím je umožněno, že skupiny rozdělovačů, které jsou k těmto trubkám napojeny mohou pracovat nezávisle na sobě. Příklad mazacího systému s progresivními rozdělovači je na obr. 1.



Obr. 1 Schéma mazacího systému s progresivními rozdělovači s jedním hlavním a třemi vedlejšími rozdělovači

Hlavní rozdělovač distribuuje mazivo do vedlejších rozdělovačů, které jej dávkují přímo ke třecím dvojicím. Výstupy maziva do mazaných míst jsou označeny čísly od 1 do 16. Ostatní vývody jsou uzavřeny.

Rozsah použitelnosti mazacích systémů s progresivními rozdělovači (dále jen progresivní systémy) je přibližně omezen následujícími parametry:

- počet mazaných míst (až 100),
- délka potrubí (až 150 m),
- tlak v hydrogenerátoru (až 40 MPa).

2.2 Prvky progresivních systémů

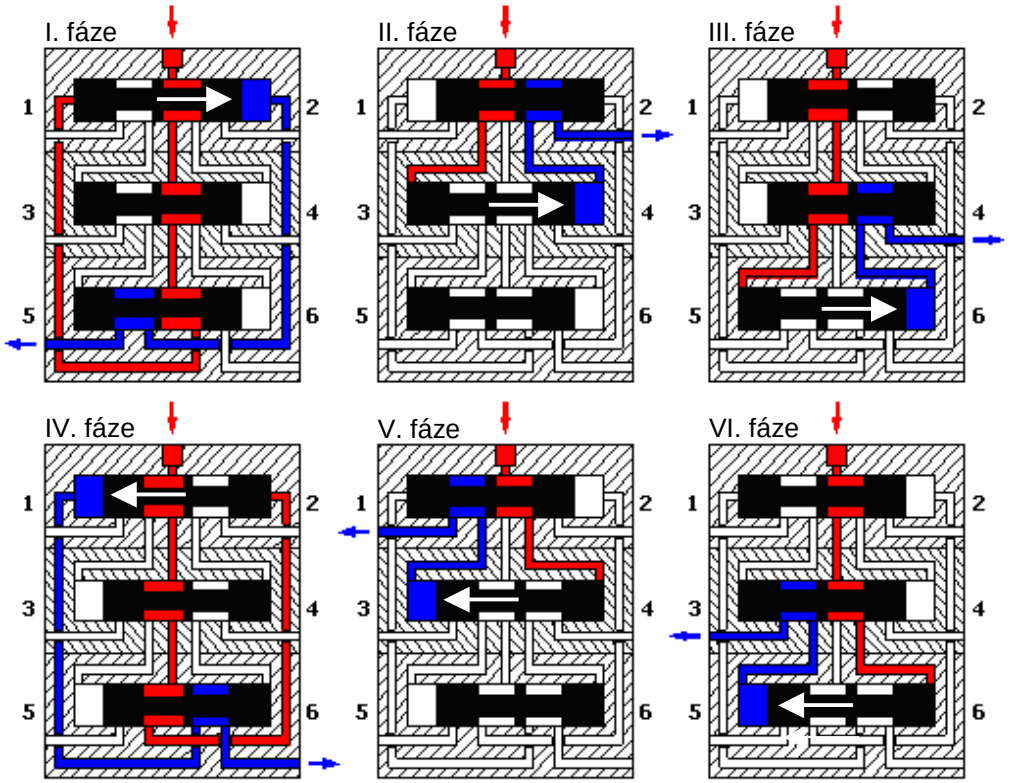
K prvkům progresivních systémů patří progresivní rozdělovače, mazací přístroje, zařízení pro sledování, řízení činnosti systému a omezování tlaku v systému.

2.2.1 Progresivní rozdělovače

Progresivní rozdělovače [Tribotec] jsou hlavními stavebnicovými prvky progresivních mazacích systémů skládajících se z 1 až 10 libovolných pracovních sekcí, sekce přívodní (vstupní) a závěrné (koncové). Jejich úkolem je postupné rozdělování vstupujícího maziva v poměru, který lze dosáhnout vhodným způsobem propojení jejich vývodů a volbou sekcí určité velikostní řady apod., více v kap. 2.4.2. Počet vývodů rozdělovače lze ovlivnit počtem jejich sekcí.

Existuje celá řada různých typů rozdělovačů od řady výrobců, které se liší vnitřní stavbou, velikostí pracovních komor sekcí a způsobem, jakým lze propojit jejich vývody. Podrobnou rešerši k rozdělovačům lze nalézt v [Ryšavý, 2003].

Princip činnosti jednoho z typů progresivních rozdělovačů je patrný z obr. 2, na kterém je znázorněn pracovní cyklus rozdělovače ZP-A [Delimon].



Obr. 2 Zjednodušený řez třísekčním progresivním rozdělovačem ZP-A (Delimon) a zobrazení jeho funkce

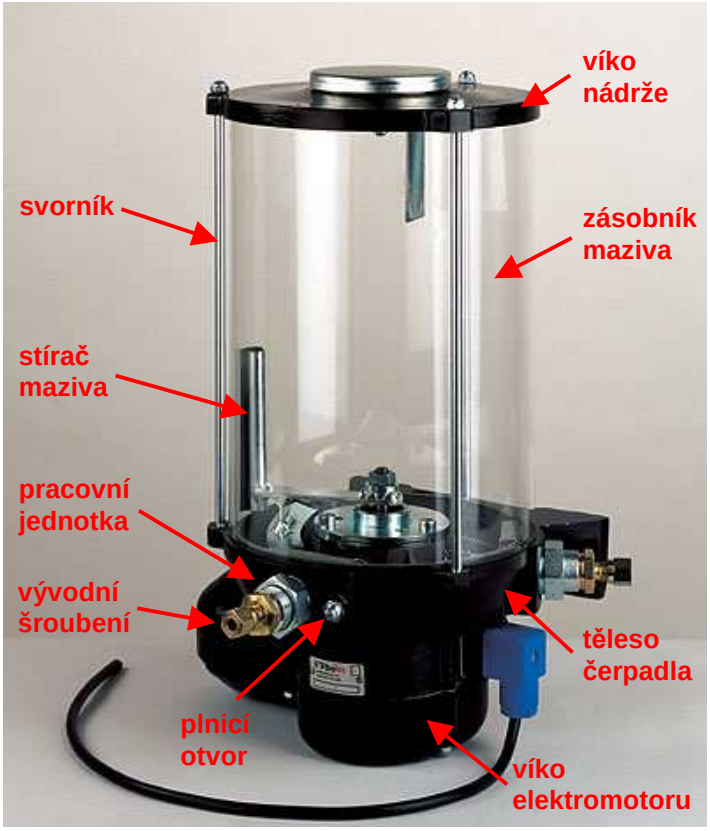
Celý pracovní cyklus třísekčního rozdělovače ZP-A lze znázornit v šesti fázích. Na levém horním obrázku, I. fáze, jsou všechny písty v levé úvrati. Vstupující mazivo má jedinou otevřenou cestu skrz pravé zápichy pístů druhé (pracovní) a třetí (závěrné) sekce do levé komory první (vstupní) sekce. Tímto se píst vstupní sekce posouvá z levé úvrati do pravé a z pravé komory vstupní sekce se vytlačuje mazivo ven z rozdělovače levým vývodem závěrné sekce. Jakmile se píst vstupní sekce přemístí do pravé úvrati, II. fáze, mazivu se otevře cesta přes levý zápich vstupní sekce do levé komory pracovní sekce. Píst pracovní sekce se poté přesouvá z levé úvratě do pravé a z pravé komory pracovní sekce se vytlačuje mazivo ven z rozdělovače pravým vývodem vstupní sekce. Celý cyklus analogicky pokračuje a uzavírá se, jakmile se všechny písty navrátí do výchozích poloh. Na obdobném principu fungují i progresivní rozdělovače jiných výrobců.

Progresivní rozdělovače jiných výrobců lze např. najít v elektronických katalozích [Vogel], [Lincoln], [Lube] apod.

Pro kontrolu činnosti progresivních rozdělovačů se používají indikátory pohybu, které se upevňují na první (poslední) sekci rozdělovače. Vykoná-li sledovaný píst dvojzdvih, znamená to, že proběhl celý pracovní cyklus rozdělovače.
K indikaci pohybu se používají optická, např. signalizační kolík, nebo elektrická signalizační zařízení, tj. mžikový nebo bezkontaktní snímač apod.

2.2.2 Mazací přístroje

K distribuci plastických maziv v systémech s progresivními rozdělovači se obvykle používají mazací přístroje na principu pístového čerpadla, obr. 3 [Tribotec], které slouží pro trvalé, pravidelné mazání různých strojů a zařízení. Především se jedná o mazání podvozků nákladních automobilů, autobusů, trolejbusů, zemědělské a lesnické techniky apod. Jsou doporučeny pro užití v mazacích obvodech s menším a středním rozsahem mazaných míst, maximálně do 100 míst.



Obr. 3 Mazací přístroj ACF (Tribotec)

Mazací přístroje tohoto druhu mohou mít několik pracovních jednotek, tzn., že mohou být použity i ve vícepotrubních systémech. Jsou opatřeny zásobníkem maziva různých objemů a pro zlepšení čerpání plastického maziva jsou vybaveny stíracím nožem a sítem.
V katalozích se uvádějí následující technické parametry: maximální tlak [bar], pracovní tlak [bar], jmenovité dodávané množství [cm^3/min/vývod], objem zásobníku maziva [dm^3], počet vývodů [-], údaje o mazivu, tj. max. třída NLGI u plastických maziv a min. viskozita u oleje [$mm^2 \cdot s^{-1}$], atd.
Technickou dokumentaci obdobných mazacích přístrojů jiných výrobců lze např. nalézt v [Delimon], [Vogel] apod.
Kromě elektricky poháněných přístrojů se používají také ruční mazací přístroje [Tribotec], [Delimon].

2.4 Projektování progresivních systémů

2.4.1 Požadavky na množství maziva

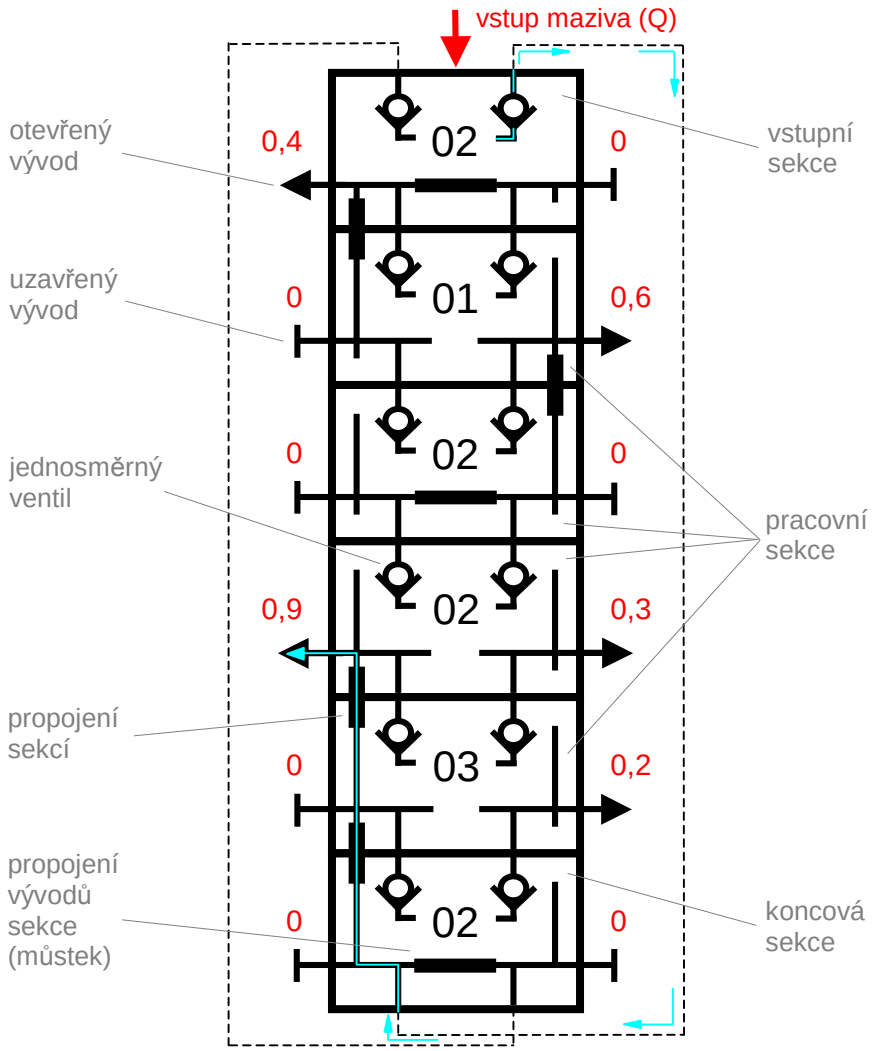
Množství maziva, přiváděného do mazacích míst, se stanoví na základě empirických vztahů z analogických konstrukcí a z obdobných případů [Nevrlý a Pavlok, 2000], [Boháček, 1983] apod.

2.4.2 Stanovení mazacích dávek

Mazací dávkou se rozumí množství maziva vytlačené z libovolného vývodu rozdělovače za jeden pracovní cyklus, tzn. [cm^3/cyklus]. Jak bylo v kap. 2.2.1 řečeno, rozdělovače se mohou skládat ze sekcí různé velikostní řady. Velikostní řada sekce představuje objem, který je možné pístem sekce vytlačit na jeden zdvih, tj. [cm^3/zdvih].

Počet sekcí v rozdělovači, jejich velikostní řada a vzájemné propojení určuje poměr dělení vstupujícího maziva. Na poměr dělení má také vliv, kolik ze všech vývodů rozdělovače je otevřeno a které z nich to jsou. Velikost mazacích dávek a poměr dělení maziva v rozdělovači lze snadno stanovit pomocí jeho schématu, které se pro různé výrobce liší.

Na obr. 4 je schéma rozdělovače ZP-A [Delimon] se šesti sekcemi (čtyři pracovní, jedna vstupní a koncová).



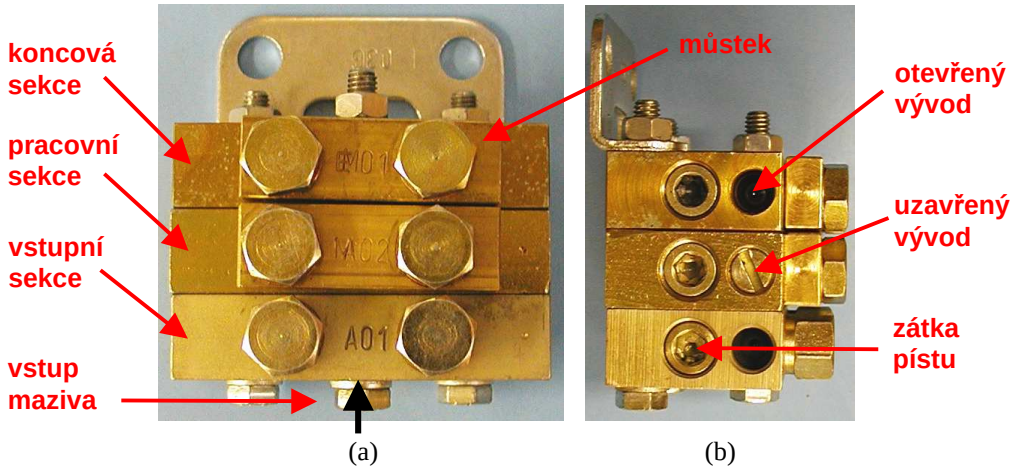
Obr. 4 Schématické značení progresivního rozdělovače ZP-A (Delimon)

Číselné označení na sekcích, tj. 01, 02 a 03, určuje jejich velikostní řadu. Čísla zobrazena u vývodů (červeně) představují velikost jedné mazací dávky, tj. [cm^3/cyklus]. Můstek slouží k propojení levého a pravého vývodu sekce. Sekce rozdělovače je možné propojit, odstraní-li se z jejich spodních stran těsnění.

Postup určení hodnoty mazacích dávek a tím i poměru dělení maziva v rozdělovači ZP-A ze schématu na obr. 4 je následující:

- za předpokladu, že jsou všechny písty v levých úvratích, viz obr. 2, je ze vstupní sekce rozdělovače vytlačováno mazivo kanálkem (čárkovaně) do koncové sekce (modré šipky),
- protože jsou levé vývody koncové a poslední pracovní sekce uzavřeny, je mazivo vytlačováno až do následující pracovní sekce, ze které levým vývodem vystupuje,
- tímto bylo při pohybu pístu vstupní sekce z levé úvratě do pravé vytlačeno množství 0,2 cm^3,
- k tomuto objemu se musí dále započítat množství maziva ze vstupní sekce při opačném pohybu pístu a dále z koncové sekce při pohybu pístu z pravé úvratě do levé, tj. opět 0,2 cm^3 a z následující pracovní sekce také při pohybu z pravé úvratě do levé, tj. 0,3 cm^3,
- velikost mazací dávky u zkoumaného vývodu je dána součtem uvedených objemů, tj. 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,3 = 0,9 cm^3,

Tímto způsobem je možné stanovit hodnoty mazacích dávek u všech ostatních vývodů rozdělovače.



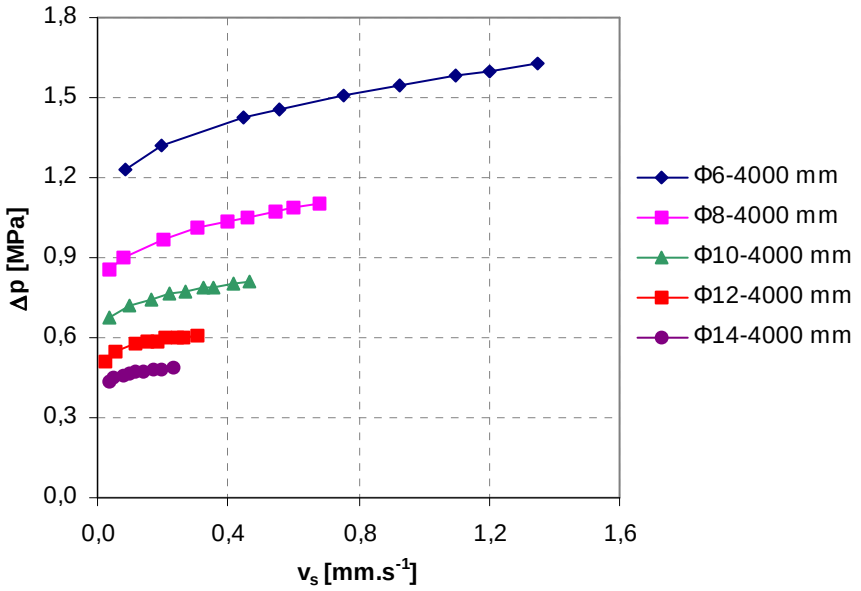
Obr. 5 Čelní (a) a (b) boční pohled na třísekční progresivní rozdělovač ZP-A (Delimon)

2.4.3 Tlakové ztráty v progresivním systému

Zjišťování tlakových ztrát v progresivním systému se provádí za účelem kontroly maximální hodnoty tlaku, kterým by mohl být zatížen zejména mazací přístroj, ale také vedení a progresivní rozdělovače. Např. pro hydrogenerátor ACF (Tribotec), obr. 3, smí být hodnota maximálního tlaku na výstupu nanejvýš 28 MPa. Z důvodu vyšší stlačitelnosti plastického maziva by bylo také zapotřebí stanovit průtokové a tlakové poměry při rozběhu nebo doběhu sloupce maziva ve vedení. Objem plastického maziva, který je z progresivních rozdělovačů vtlačován do výstupních vedení nemusí být ihned a ve stejném množství vytlačen ke třecím dvojícím. Existující odpor proti pohybu při toku plastického maziva má za následek, že nejprve dochází ke stlačování maziva a teprve potom k dodávce maziva do prostoru třecí dvojice. Zvláště je to důležité, pokud mazací systém pracuje periodicky. Problematika stanovení průtokových poměrů při rozběhu a doběhu plastického maziva ve vedení je jedním z cílů disertační práce, viz kap. 7.

Tlakové ztráty ve vedení progresivního systému lze přibližně stanovit pomocí nomogramu od firmy VOGEL [Nevrlý a Pavlok, 2000], kde je ztráta tlaku uváděna v Δp [bar/m] a průtok Q [cm^3/s]. Tento nomogram platí pro plastické mazivo NLGI třídy 1, kap. 3.1. Pro plastická

maziva jiné penetrace se hodnota tlakové ztráty musí násobit příslušným součinitelem, např. pro NLGI třídu 0 je hodnota součinitele 0,6 a pro NLGI třídu 2 je součinitel roven 1,6.
Metoda určení tlakových ztrát pomocí nomogramu fy VOGEL byla porovnána s experimentálními výsledky a mezi těmito hodnotami byly zjištěny velké rozdíly [Nevrlý a Pavlok, 2000]. Např. při toku maziva MOGUL LA2 trubicí (ϕ4-5440 mm, t = 19,2°C a Q = 0,03 $cm^3 \cdot s^{-1}$) bylo z diagramu fy VOGEL odečteno: $\Delta p = 1{,}1$ bar$\cdot m^{-1}$, tzn., že na celé délce trubice s opravným součinitelem 1,6 pro třídu NLGI 2 je tlakový spád $\Delta p = 1{,}1 \cdot 5{,}44 \cdot 1{,}6 = 9{,}6$ bar. Naměřená hodnota byla mnohem vyšší $\Delta p = 33{,}9$ bar. Žádná jiná přesnější metodika k určování tlakových ztrát z grafů nebyla ve firemní literatuře nalezena.
V [Savić a Knežević, 1999] je pro výpočet tlakové ztráty v mazacím systému uváděna Poisseuilleova rovnice, která je násobena dvěma opravnými koeficienty, jejichž hodnoty jsou závislé na tlaku a průměru potrubí.
Další možný způsob stanovení tlakové ztráty ve vedení při ustáleném průtoku plastického maziva je možný prostřednictvím výpočtových vztahů (24) a (34), viz kap. 3. Tyto vztahy avšak představují závislost střední rychlosti na tlakovém spádu, tj. $v_s = f(\Delta p)$. Tzn., že lze na základě známého tlakového spádu, reologických konstant plastického maziva a rozměrů vedení stanovit velikost střední rychlosti [Špaček a Pavlok, 2003]. Vypočítané hodnoty středních rychlosti je možné zobrazit jako funkci $\Delta p = f(v_s)$ a aproximovat vhodnými matematickým vztahem. Pro plastické mazivo určitých reologických konstant (při konstantní teplotě a stupni prohnětení), vznikne pro vedení určitých odstupňovaných rozměrů (pro různé průměry ϕd při konstantní délce l vedení) soubor křivek, viz obr. 6.



Obr. 6 Výsledky experimentálního měření tlakových ztrát na přímých trubicích, ekologické plastické mazivo Plantogel 2S, t = 17,5-19,8°C

Rozsah měření, viz obr. 6, odpovídá možnostem experimentálního zařízení. Více je uvedeno v kap. 6.
Vztahy (24) a (34) nelze analyticky upravit tak, aby byl tlakový spád funkcí pouze střední rychlosti [Janalík, 2002], lze je jen převést na tvar $\Delta p = f(v_s, \Delta p)$. K výpočtu tlakové ztráty z takovýchto vztahů by bylo tedy zapotřebí zvolit vhodné numerické postupy.
Ke stanovení tlakových ztrát na progresivních rozdělovačích nebyly v literatuře nalezeny žádné výpočtové vztahy. V [Fiala, 2006] lze najít výsledky experimentálních měření tlakových ztrát na progresivním rozdělovači ZP-A.

3. Laminární tok plastických maziv

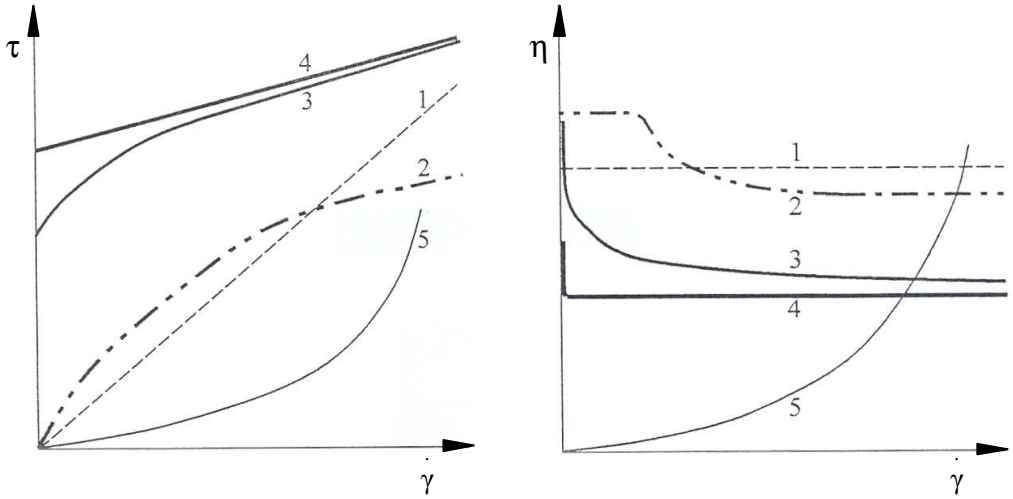
Plastická maziva patří mezi nenewtonské kapaliny [Nevrlý a Pavlok, 2000], které se neřídí Newtonovým zákonem, podle něhož je smykové napětí lineární funkcí gradientu rychlosti

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \eta \cdot \dot{\gamma}, \tag{1}$$

ale obecně rovnicí ve tvaru:

$$\tau = \tau(\dot{\gamma}), \tag{2}$$

kde: η – dynamická viskozita [Pa·s], γ – úhel zkosení, který charakterizuje smykovou deformaci [-], $\dot{\gamma}$ - gradient rychlosti [s^{-1}].
Viskozita plastických maziv závisí především na fyzikálně-chemickém složení, na teplotě, tlaku, na čase (tento parametr znamená, že viskozita závisí na tom, zda byla kapalina v klidu nebo pohybu, jak dlouho a jak intenzivně byla hnětena) apod.
Závislosti mezi smykovým napětím a rychlostním gradientem se zobrazují, jako tzv. tokové křivky (reogramy). Příklady reogramů různých typů kapalin jsou na obr. 7.



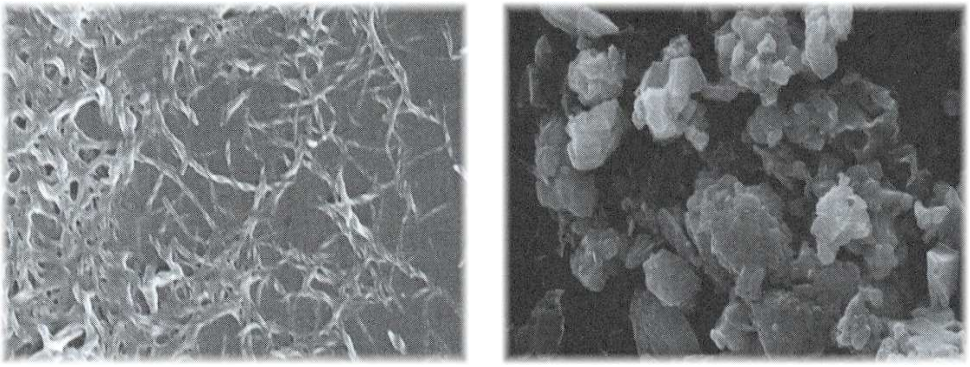
Obr. 7 Různé typy reogramů, (1) newtonská kapalina, (2), (3), (4), (5) nenewtonské kapaliny; (2) pseudoplastická kapalina, (3) skutečná vazkoplastická kapalina, (4) ideálně vazkoplastická (binghamská) kapalina, (5) dilatantní kapalina

Plastická maziva patří mezi skutečné vazkoplastické kapaliny, u kterých je průběh smykového napětí dle obr. 7, křivka 3. K matematickému popisu této závislosti lze použít Herschel-Bulkleyův reologický model, viz kap. 3.2. K popisu průběhu smykového napětí v plastickém mazivu lze také za určitých podmínek s výhodou použít tzv. Binghamův reologický model, obr. 7, křivka 4.

3.1 Vlastnosti plastických maziv

Plastická maziva [Nevrlý a Pavlok, 2000], [Czarny, 2004] jsou koloidní soustavy. Spojitou fázi tvoří mazací olej, rozptýlenou fázi zpevňovadlo. Mazací olej je převážně ropného původu, u tzv. ekologických maziv rostlinného nebo syntetického původu. Kapalná složka bývá zastoupena 70-90% a zpevňovadlo 5-30%. Nejčastěji používanými zpevňovadly jsou mýdla některých kovů: lithia, sodíku, vápníku, hliníku. Zpevňovadlo tvoří strukturní mřížku, v níž je vázána olejová složka. Při zatížení se mřížka deformuje a kapalná složka je z ní vytlačována. Zušlechťující přísady jsou zastoupeny 0,5-5%. Jsou to zejména antioxidanty, antikorodanty, vysokotlaké přísady apod.

Podle typu a množství zpevňovadla mohou mít maziva různou konzistenci: od velmi měkké až po velmi tuhou. Charakteristika maziv podle druhu zpevňovadla je uvedena v [Nevrlý a Pavlok, 2000]. Konzistence plastického maziva je klasifikována podle stupnice zavedené organizací NLGI (National Lubricating Grease Institut). Hodnotí se velikostí penetrace (vniknutí) normalizovaného kužele za daných podmínek do plastického maziva. Číslo udává hloubku vniknutí v desetinách milimetru. Penetrace se měří v prohněteném stavu při t = 25°C. Prohnětení se provádí v normalizovaném hnětadle šedesáti dvojzdvihy děrované destičky za dobu 60 s. Stupně konzistence dle NLGI jsou v [Nevrlý a Pavlok, 2000].



(a) (b)

Obr. 8 Vnitřní struktura plastických maziv pod mikroskopem, (a) tvar vláken lithného maziva ve zvětšení 30 000 x pod skenovacím mikroskopem SEM,
(b) bentonitová hlinka ve zvětšení 20 000 x pod skenovacím mikroskopem SEM

Bod skápnutí je teplota, při níž se za podmínek zkoušky v normovaném přístroji oddělí z plastického maziva první kapka.
Vlivem hnětení, tj. působením smykového napětí, se mění reologické vlastnosti plastického maziva, stává se tekutějším. Takovéto chování látky se nazývá **tixotropie**, která se na reogramu projeví hysterezní křivkou, obr. 22-23. Tixotropie se vysvětluje rozpadem struktury založené na slabých vazbách, tj. iontové, vodíkové apod. Současně se předpokládá, že se po určité době struktura samovolně opět obnoví. U plastických maziv nedochází zcela k obnově původních vlastností [Czarny, 2004], protože se hnětením navíc trvale rozpadá vnitřní struktura zpevňovadla.
Makroskopicky jsou plastická maziva máslovitá, vláknitá, houbovitá nebo zrnitá, viz obr. 8. Krystality zpevňovadla mají různou délku vlákna a průměr vlákna, podle druhu kationtu a složení zpevňovadla. Mezi krystality zpevňovadla a olejovou fází působí síly vzájemné přitažlivosti (fyzikální absorbce, případně i chemické absorbce). Čím je poměr povrchu krystalitů k jejich objemu větší, tím je soustava stálejší.

3.2 Reologické modely

Pro charakterizování tokových vlastností plastických maziv a ostatních nenewtonských kapalin hraje důležitou roli měření smykového napětí v závislosti na smykové rychlosti.
K popisu takových experimentálně změřených tokových křivek (reogramů) byla navržena řada empirických vztahů - reologických modelů [Giesekus, 1994]. Nejjednodušší model pro pseudoplastické kapaliny byl navržen Ostwaldem a de Waeleem

$$\tau = K \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \cdot \dot{\gamma}, \text{ pro } K > 0,\ n > 0, \qquad (3)$$

kde se n označuje jako index toku a K jako koeficient konzistence. V případě, že je n = 1, nastává speciální případ – newtonská kapalina. Přičemž K má poté význam dynamické viskozity η. Viskózní funkce podle Ostwalde-de Waelova modelu

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \tag{4}$$

má pro n < 1 monotónně klesající a pro n > 1 je monotónně rostoucí průběh. Je zřejmé, že jen v omezeném smyslu lze tento vztah chápat, jako tokový zákon, protože pro $\dot{\gamma} \to 0$ a $\dot{\gamma} \to \infty$ předpokládá nerealistické chování proudící kapaliny:

$$\begin{aligned} \lim_{\dot{\gamma}\to 0} \eta(\dot{\gamma}) &= \begin{cases} \infty & \text{pro } n < 1, \\ 0 & \text{pro } n > 1, \end{cases} \\ \lim_{\dot{\gamma}\to \infty} \eta(\dot{\gamma}) &= \begin{cases} 0 & \text{pro } n < 1, \\ \infty & \text{pro } n > 1. \end{cases} \end{aligned} \tag{5}$$

K nejjednodušším vazkoplastickým modelům patří Binghamův reologický model, jehož tvar je následující:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \tau_f + \eta_B \cdot \dot{\gamma} & \text{pro } \dot{\gamma} > 0, \\ -\tau_f + \eta_B \cdot \dot{\gamma} & \text{pro } \dot{\gamma} < 0. \end{cases} \tag{6}$$

Tento vztah platí pouze pro $\dot{\gamma} > 0$ a $\dot{\gamma} < 0$. Pro $\dot{\gamma} = 0$ zůstává smykové napětí neurčeno. Uvedený stav je možné souhrně vyjádřit následujícím způsobem:

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

Konstanta η_B se v Binghamově modelu označuje jako Binghamova viskozita a τ_f jako počáteční smykové napětí. Pro viskozitu závislou na smykové rychlosti a napětí platí

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_B + \frac{\tau_f}{|\dot{\gamma}|} \text{ pro } |\dot{\gamma}| > 0, \tag{8}$$

$$\eta(\tau) = \frac{\eta_B}{1 - \tau_f / |\tau|} \text{ pro } |\tau| > \tau_f. \tag{9}$$

K přesnější náhradě tokové závislosti u vazkoplastické kapaliny slouží Herschel-Bulkleův model, podle kterého je smykové napětí definováno následujícím způsobem:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \tau_f + K \cdot \dot{\gamma}^n & \text{pro } \dot{\gamma} > 0, \\ -\tau_f + K \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \cdot \dot{\gamma} & \text{pro } \dot{\gamma} < 0. \end{cases} \tag{10}$$

Viskózní funkce jsou podle Herschel-Bulkleyova modelu potom definovány následujícími vztahy:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{1}{|\dot{\gamma}|} \cdot (K + \tau_f \cdot |\dot{\gamma}|^n) \quad \text{pro} \quad |\dot{\gamma}| > 0, \tag{11}$$

$$\eta(\tau) = \frac{K^{1/n} \cdot |\tau|}{(|\tau| - \tau_f)^{1/n}} \qquad \text{pro} \qquad |\tau| > \tau_f \,. \tag{12}$$

Reologické modely dále vstupují, jako stavové rovnice do vztahů popisujících proudění pseudoplastických nebo vazkoplastických kapalin.

3.3 Rovnice laminárního toku

K popisu ustáleného laminárního toku plastických maziv mají význam modely typu Bingham a Herschel-Bulkley [Janalík, 2002], [Spurk a Aksel, 2005].
Z rovnováhy tlakových a třecích sil na element kapaliny jsou stanoveny vztahy pro rychlost a průtok v trubicích kruhového průřezu, obr. 9.

3.3.1 Binghamův model

Velikost smykového napětí je u binghamské kapaliny dána rovnicí (6), která má po úpravě následující podobu

$$\tau = \tau_f + \eta_B \cdot \left(-\frac{du}{dr} \right). \tag{13}$$

Z rovnováhy tlakových a třecích sil, obr. 9, na element kapaliny (elementární objem kapaliny ve tvaru souosého válce) vyplývá následující vztah:

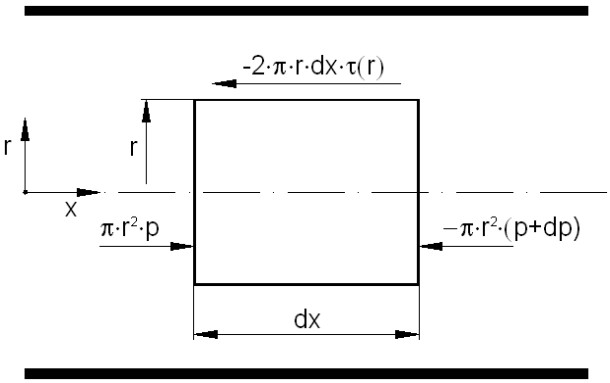
$$p \cdot \pi \cdot r^2 - (p + dp) \cdot \pi \cdot r^2 - 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dx \cdot \tau(r) = 0 \,, \tag{14}$$

ze kterého se stanoví velikost smykového napětí

$$\tau(r) = -\frac{dp}{2 \cdot dx} \cdot r = \frac{p_z}{2 \cdot l} \cdot r \,. \tag{15}$$

Z rovnice rovnováhy sil na element kapaliny dále vyplývá vztah pro počáteční smykové napětí:

$$\tau_f = \frac{p_z}{2 \cdot l} \cdot r_0 \,. \tag{16}$$



Obr. 9 Rovnováha tlakových a vazkých sil na element kapaliny při laminárním proudění v potrubí kruhového průřezu

Rychlostní profil v potrubí kruhového průřezu se stanoví z rovnice (13) a z rovnice rovnováhy sil (15). Po dosazení má vztah následující podobu:

$$\frac{p_z \cdot r}{2 \cdot l} = \tau_f + \eta_B \cdot \left(-\frac{du}{dr} \right), \tag{17}$$

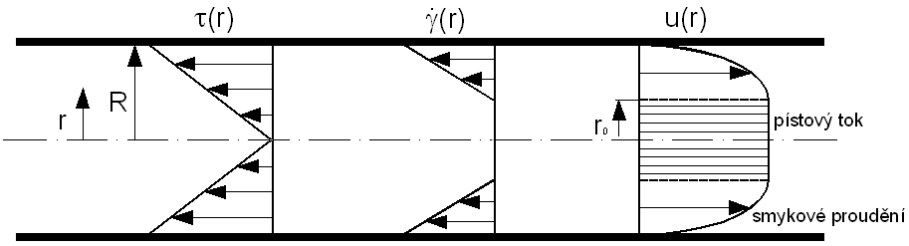
Odtud vyplývá

$$\frac{du}{dr} = \frac{1}{\eta_B} \cdot \left(-\frac{p_z \cdot r}{2 \cdot l} + \tau_f \right) \text{ pro } \tau > \tau_f \,. \tag{18}$$

Po integraci a pro počáteční podmínky r = R, u = 0 obdržíme vztah pro rychlost:

$$u = \frac{p_z}{4 \cdot l \cdot \eta_B} \cdot (R^2 - r^2) - \frac{\tau_f}{\eta_B} \cdot (R - r) \,. \tag{19}$$

Tvar rychlostního profilu, gradient rychlosti a průběh smykového napětí je u binghamské kapaliny zobrazen na obr. 10.



Obr. 10 Rychlostní profil, gradient rychlosti a smykového napětí u binghamské kapaliny

Pro $r = r_0$ je rychlost pístové části toku

$$u_0 = \frac{p_z}{4 \cdot l \cdot \eta_B} \cdot (R - r_0)^2 \,. \tag{20}$$

Vztah pro objemový průtok v okrajové části potrubí má následující tvar

$$Q_1 = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_0}^{R} r \cdot u \cdot dr = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \eta_B} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right) - 2 \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^3 - \frac{5}{3} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right] \tag{21}$$

a objemový průtok v pístové části toku je

$$Q_2 = \pi \cdot r_0^2 \cdot u_0 = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \eta_B} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^3 + 2 \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right]. \tag{22}$$

Celkový objemový průtok je potom součtem průtoků Q_1 a Q_2:

$$Q = Q_1 + Q_2 \,. \tag{23}$$

Z celkového průtoku lze dále odvodit vztah pro střední rychlost v potrubí

$$v_s = \frac{Q}{\pi \cdot R^2} = \frac{p_z \cdot R^2}{8 \cdot l \cdot \eta_B} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right]. \tag{24}$$

3.3.2 Herschel-Bulkleyův model

Velikost smykového napětí je u Herschel-Bulkleyova modelu definovaná rovnicí (10) a úpravou tohoto vztahu lze získat následující tvar:

$$\tau = \tau_f + K \cdot \left(-\frac{du}{dr} \right)^n \tag{25}$$

Po dosazení z podmínky rovnováhy sil (15) do rovnice (25) obdržíme:

$$\frac{p_z \cdot r}{2 \cdot l} = \tau_f + K \cdot \left(-\frac{du}{dr} \right)^n . \tag{26}$$

Odtud vyplývá

$$\frac{du}{dr} = -\left(\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{p_z \cdot r}{2 \cdot l} - \tau_f\right)^{\frac{1}{n}} = -\frac{1}{\eta_0} \cdot \left(\frac{p_z}{2 \cdot l}\right)^m \cdot (r - r_0)^m, \tag{27}$$

kde

$$m = \frac{1}{n}, \ \eta_0 = K^m. \tag{28}$$

Po integraci a určení integrační konstanty z okrajových podmínek r = R, u = 0 je rychlost v okrajové části potrubí:

$$u = \frac{1}{\eta_0} \cdot \left(\frac{p_z}{2 \cdot l}\right)^m \cdot \frac{1}{m+1} \cdot [(R - r_0)^{m+1} - (r - r_0)^{m+1}] \tag{29}$$

a rychlost v pístové části je:

$$u_0 = \frac{1}{\eta_0} \cdot \left(\frac{p_z}{2 \cdot l}\right)^m \cdot \frac{1}{m+1} \cdot (R - r_0)^{m+1}. \tag{30}$$

Průtok v okrajové části trubice je poté dán následujícím vztahem:

$$Q_1 = \frac{\pi}{\eta_0}\left(\frac{p_z}{2 \cdot l}\right)^m \frac{1}{m+1}\left[(R - r_0)^{m+1}(R^2 - r_0^2) - \frac{(R - r_0)^{m+2} 2R}{m+2} + \frac{2 \cdot (R - r_0)^{m+3}}{(m+2) \cdot (m+3)}\right]. \tag{31}$$

Průtok v pístové části trubice je:

$$Q_2 = \pi \cdot r_0^2 \cdot u_0 = \frac{\pi}{\eta_0} \cdot \left(\frac{p_z}{2 \cdot l}\right)^m \cdot \frac{1}{m+1} \cdot (R - r_0)^{m+1} \cdot r_0^2. \tag{32}$$

Celkový průtok v trubici je dán součtem průtoků v okrajové a vnitřní části trubice:

$$Q = Q_1 + Q_2. \tag{33}$$

Z celkového průtoku Q je následně stanovena střední rychlost proudění

$$v_s = \frac{Q}{\pi \cdot R^2} = \frac{1}{\eta_0} \cdot \left(\frac{p_z \cdot R}{2 \cdot l}\right)^m \cdot R \cdot \varphi, \tag{34}$$

kde

$$\varphi = \left[\frac{(1-\alpha)^{m+1}}{m+1} - \frac{2 \cdot (1-\alpha)^{m+2}}{(m+1) \cdot (m+2)} + \frac{2 \cdot (1-\alpha)^{m+3}}{(m+1) \cdot (m+2) \cdot (m+3)}\right] \tag{35}$$

a

$$\alpha = \frac{r_0}{R}. \tag{36}$$

3.4 Modelování toku plastických maziv

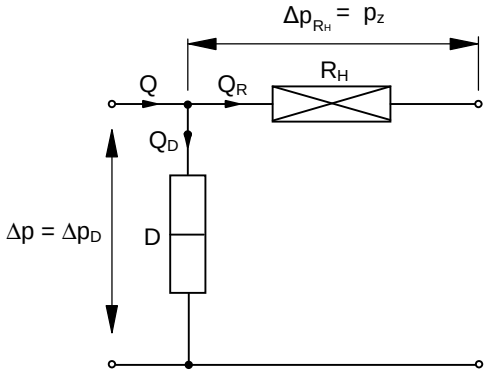
Dynamické procesy v hydraulickém vedení je možno simulovat dvěma modely [Noskievič, 1995]. První model respektuje spojité rozložení parametrů (tlak, rychlost proudění, hmotnost kapaliny) podél vedení a představuje systém parciálních diferenciálních rovnic (vlnové rovnice). Druhý model představuje vedení, jako prvek se soustředěnými parametry.

Pro posouzení vhodnosti matematického modelu vedení je třeba porovnat vlnovou délku oscilačních změn s rozměry potrubí, tj. s průměrem d a délkou l. Pokud je vlnová délka oscilační změny ve vedení značně menší než průměr potrubí d a jeho délka l, tj. $\lambda_v \ll d$, $\lambda_v \ll l$,

pak je zapotřebí matematický model s objemově spojitě rozloženými parametry. Mezním kritériem je např. vztah

$$\lambda_v > 4 \cdot l. \tag{37}$$

Jiná vyjádření tohoto mezního kritéria lze např. najít v [Zymák, 1994].
Tok plastických maziv v progresivních rozdělovačích lze modelovat na základě elektro-hydraulické analogie [Dvořák, 2003], [Vepřek, 2005a], [Vepřek, 2005b], protože jsou rozměry a vnitřní objemy těchto prvků malé.



Obr. 11 Seriově-paralelní řazení odporů proti pohybu R_H a deformaci D (L-článek)

V hydraulickém vedení mazacího obvodu je situace obtížnější. Za předpokladu, že je frekvence tlakových (průtokových) změn malá a jsou splněny výše uvedené podmínky, lze použít modely se soustředěnými parametry. Rozhodnutí závisí i na materiálu potrubí. Např. v ocelové bezešvé trubce s rozměry ϕ6-4000 mm byla při proudění ekologického plastického maziva Plantogel 2S vypočítána rychlost zvuku a = 56,92 $m \cdot s^{-1}$ (střední hodnota tlaku na vstupu do trubice p_1 = 5,65 MPa, na výstupu p_2 = 4,01 MPa; teplota t = 20,1°C), kap. 6.2.2. Tzn., že při frekvenci průtokových změn hydrogenerátoru (ACF 02) f = 0,34 s^{-1} lze použít modely se soustředěnými parametry dle uvedeného kritéria (37) do délky vedení l = 41,57 m. U plastických maziv s nižší konzistencí bude rozsah použití modelů se soustředěnými parametry větší.
Tok stlačitelného maziva v dokonale pružném vedení lze modelovat např. pomocí L-článku [Noskievič, 1999]. Toto seriově-paralelní řazení odporů proti pohybu a deformaci je zobrazeno na obr. 11. Z důvodu pomalého pohybu plastického maziva ve vedení lze zanedbat odpor proti zrychlení.
Z Kirchhoffova zákonu o okruzích vyplývá vztah

$$\Delta p = \Delta p_D = \Delta p_{R_H}, \tag{38}$$

ve kterém Δp představuje celkový tlakový spád na vedení, Δp_D je spád na odporu proti deformaci a p_z tlakový spád na odporu proti pohybu.
Z Kirchhoffova zákonu o uzlech vyplývá rovnice pro průtok

$$Q = Q_D + Q_{R_H}. \tag{39}$$

Průtok přes odpor proti deformaci je určen vztahem

$$Q_D = C \cdot \frac{d(\Delta p)}{dt}, \tag{40}$$

kde C představuje hydraulickou kapacitu, která je reciprokou hodnotou odporu proti deformaci. Odpor proti deformaci je dán následujícím vztahem

$$D = \frac{\Delta p}{\Delta V} = \frac{d(\Delta p)}{d(\Delta V)}. \tag{41}$$

Průtok přes odpor proti pohybu je např. pro binghamskou kapalinu dán úpravou vztahu (24) a jeho podoba je následující

$$Q_{R_H} = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \eta_B} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right], \text{ platí pro } (p_z \cdot R)/(2 \cdot l \cdot \tau_f) \geq 1. \quad (42)$$

Uvedené rovnice (38) až (42) tvoří soustavu rovnic, které představují nejjednodušší matematický model vedení mazacího obvodu. Systém rovnic lze řešit v simulačním software DYNAST [Dynast]. Tento software umožňuje řešit soustavy lineárních i nelineárních algebraických, diferenciálních a integrálních rovnic. Problém lze v programu DYNAST formulovat také pomocí branových schémat [DYNLAB], viz kap. 6.3.

Další přehled způsobu řešení toku nenewtonských kapalin a plastických maziv lze najít v následující literatuře. V [Nevrlý a Pavlok, 2000] je uveden nástin matematického modelování toku plastického maziva pomocí aparátu mechaniky kontinua. Dále jsou zde uvedeny způsoby modelování bipolární barotropní nenewtonské tekutiny, asymptotické režimy proudění při pulzačním toku binghamských kapalin, popis proudění nelineárně viskózních kapalin pomocí speciálních funkcí a modelování dynamiky plastického maziva pomocí experimentálního zařízení metodou soustředěných parametrů, který lze také nalézt v [Nevrlý at al., 2004d] a [Nováková, 1999]. V literatuře [Wein at al., 1989] je uvedena problematika periodických toků nenewtonských kapalin, v [Giesekus, 1994] lze najít řadu příkladů proudění nenewtonských kapalin, které se týkají problematiky reometrického měření.

4. Optimalizace progresivních systémů

4.1 Cíl optimalizace

Cílem optimalizace mazacích systémů s progresivními rozdělovači je splnění následujících požadavků:

- zajištění optimální dodávky maziva ke všem třecím místům v předepsaných intervalech nebo kontinuálně,
- minimální počet progresivních rozdělovačů v obvodu, které by měly mít co nejmenší počet sekcí tak, aby náklady na pořízení progresivního systému byly co nejmenší.

Optimální dodávku maziva lze docílit vhodným počtem rozdělovačů v obvodu s určitou hierarchii uspořádání, tj. hlavní rozdělovač, vedlejší rozdělovače, viz kap. 2.1 a vhodnou konstrukční úpravou, viz kap. 2.4.2. Konstrukční úprava rozdělovače je dána počtem sekcí určité velikostní řady, způsobem propojení vývodů sekcí a tím, kolik vývodů rozdělovače je otevřeno a které z nich to jsou.

4.2 Optimalizace pomocí genetických algoritmů

K optimalizaci progresivních systémů jsou vhodné genetické algoritmy, které patří do skupiny smíšených optimalizačních algoritmů [Zelinka, 2002]. Tato třída algoritmů představuje „rafinovanou“ směs metod deterministických a stochastických, které ve vzájemné spolupráci dosahují překvapivě dobrých výsledků. Algoritmy smíšeného charakteru jsou:

- robusní, tzn., že nezávisle na počátečních podmínkách velmi často naleznou kvalitní řešení, jež je reprezentováno obvykle jedním či více globálními extrémy,
- efektivní a výkonné, tzn., že jsou schopny nalézat kvalitní řešení během relativně malého počtu ohodnocení účelové funkce viz kap. 5.2.2,
- jsou odlišné od čistě stochastických metod (díky přítomnosti deterministických metod),
- mají minimální nebo žádné požadavky na předběžné informace,
- jsou schopné pracovat s problémy typu „černá skříňka“, tzn., že nepotřebují ke své činnosti analytický popis problému,
- jsou schopny nalézt více řešení během jednoho spuštění výpočtu.

Změnou účelové funkce lze změnit předmět optimalizace. Např. může být kritériem spotřeba maziva, anebo jsou hlediskem náklady na pořízení mazacího obvodu, případně kombinace obou uvedených kritérií. Do účelové funkce lze tedy zahrnou více faktorů.

Genetické algoritmy byly úspěšně aplikovány k řešení řady problémů technického i netechnického rázu. Šíři škály aplikačních možností, zejména v technických oborech, ilustruje sborník [Dasgupta a Michalewicz, 1997] popisující na více než 500 stranách aplikace ze čtyř inženýrských oborů. Ve strojírenství vedle strukturálního návrhu strojních sestav a optimalizace jejich parametrů se v tomto oboru objevují i aplikace ekonomicky orientované. Mezi ně patří vedle logistických problémů a úloh tvorby rozvrhu výroby i úloha „optimalizace nářezového plánu“. Tato úloha má dvě varianty: jednorozměrná, kdy jde o řezání tyčí a dvourozměrná, kdy jsou vyřezávány tvary z pásu či tabule plechu.

V předchozích kap. 2-3 byla nastíněná problematika progresivních mazacích obvodů, byly popsány charakteristické vlastnosti plastických maziv a reologické modely, které je možné využít k matematickému popisu jejich vlastností za toku. Na základě uvedených reologických modelů, tj. Bingham a Herschel-Bulkley, byl odvozen matematický aparát, se kterým je možné modelovat laminární tok plastických maziv.

V kapitole 5 je uveden popis genetických algoritmů, tj. princip, struktura, popis částí algoritmů a jejich další varianty. V úvodní části kap. 6 je uveden popis programu GenetikaRozdělovač_II, který byl vytvořen k optimalizaci rozdělovačů ZP-A. Dále jsou zde uvedeny výsledky optimalizace pro zadané vstupní požadavky. V programu je implementován genetický algoritmus.

5. Genetické algoritmy

5.1 Úvod

Genetické algoritmy [Ošmera, 2001], [Mařík et al., 2001] a [Zelinka, 2002] (GA) patří do skupiny evolučních algoritmů, které pokrývají širší třídu netradičních výpočetních postupů. Svou inspiraci nacházejí v přírodních vývojových procesech. Jsou založeny na mechanismu Darwinova přirozeného vývoje a Mendelovy dědičnosti, tzn., že kombinují adaptivní a evoluční vývoj organismu s funkční optimalizací. Silná náhodná složka algoritmu ovlivňuje nezanedbatelným způsobem jeho vlastnosti a celkové chování. GA lze z hlediska použitých metod, stochastických a deterministických, zařadit do skupiny smíšených algoritmů.
Evoluční algoritmy a tedy GA se obvykle používají tam, kde je řešení daného problému analytickou cestou nevhodné či nereálné. Tyto algoritmy umožňují řešit velmi složité problémy efektivním způsobem, takže se staly velmi oblíbené a používané v mnoha inženýrských oborech.

5.2 Princip genetických algoritmů

Tradiční optimalizační postupy vycházejí z vhodného (nebo i náhodně zvoleného) počátečního odhadu řešení, které iterativně vylepšují. Naproti tomu GA nepracují s jedním kandidátem řešení daného problému, nýbrž s jejich množinami, tj. s populacemi jedinců – kandidátů $x_{tv,i}$ ve tvaru

$$G(t) = \{x_{t_v,1}, x_{t_v,2}, ..., x_{t_v,N}\}, \tag{43}$$

kde t_V je vývojový čas a N označuje rozsah populace (tento parametr se mnohdy označuje jako *PopSize*). Vývojový čas zpravidla běží v diskrétních krocích a v tomto časovém pohledu se o posloupnosti populací často hovoří jako o generacích.
Všechna individua v populaci jsou implementovaná pomocí týchž datových struktur S ve tvaru řetězců (s_1, s_2, …, s_L) konečné délky L, v analogii s obecnou genetikou nazývaných chromozómy. Při popisu lze použít i počítačovou terminologii (bitový řetězec). Chromozómy jsou tvořeny posloupnostmi symbolů s_i a každá pozice v řetězci se ve shodě s terminologií obecné genetiky nazývá alela. Každý symbol s_i je vybrán z určité, zpravidla konečné, abecedy $\mathcal{A}_i$, tj. s_i 0 $\mathcal{A}_i$. Zpravidla $\mathcal{A}_i = \mathcal{A}$ pro všechna i, tedy všechny symboly pocházející z téže abecedy. Konkrétní symbol v chromozomu se nazývá gen.
Každé individuum $x_{tv,i}$ je ohodnoceno svojí mírou kvality. Touto „kvalitou“ může být pro technické použití téměř libovolné ohodnocení jedince. Většinou stačí, aby bylo možné vzájemně porovnat jedince mezi sebou s ohledem na jejich kvalitu. V převážné většině případů má ohodnocení formu reálné funkce definované pro každého jedince reprezentovaného strukturou S (tedy zobrazení ve tvaru f: S → $\mathcal{R}$).

Mechanismus standardního GA je tedy překvapivě jednoduchý, zahrnuje kopírování bitových řetězců a výměnu jejich úseku. Vysvětlení, proč tento na první pohled jednoduchý algoritmus funguje, je avšak mnohem složitější. K objasnění jeho chování přispěla teorie o schématech [Holland, 1975]. Existuje celá řada variant GA, pro něž byl vybudován i aparát snažící se vysvětlit jejich činnost.

5.2.1 Obecný tvar genetického algoritmu

Obecný tvar evolučního algoritmu a tím tedy i GA lze v pseudokódu zapsat tak, jak je patrné z obr. 12.
Tento algoritmus běží v cyklu, který simuluje vývojový čas. Na počátku je vývojový čas nastaven na nulu a v kroku **inicializace** $G(t_v)$ je vhodným způsobem vytvořena počáteční populace jedinců. Nejobvyklejším způsobem inicializace je vytvoření množiny náhodných jedinců.

```
begin
      tv := 0;
      inicializace G(tv)
      vyhodnocení G(tv);
      while (not zastavovací_pravidlo) do
      begin
            tv := tv+1;
            selekce G(tv) z G(tv-1);
            změna G(tv);
            vyhodnocení G(tv);
      end
end
```

Obr. 12 Základní tvar evolučního (genetického) algoritmu

Operace **vyhodnocení** $G(t_v)$ skrývá v sobě výpočet kvality všech jedinců v populaci. Navíc se obvykle vyhledá nejlepší jedinec a vypočtou se i statistické vlastnosti populace, jako její průměr, rozptyl apod.

Selekce simuluje v GA proces přirozeného výběru – zápasu o přežití – a vybírá jedince z předchozí populace do nové, obvykle na základě jejich ohodnocení. Jedinci jsou v rámci selekce vybíráni zpravidla pravděpodobnostním mechanismem, přičemž lepší jedinci mají vyšší šanci být vybráni za prvky následující generace. Průměrní jedinci se v nové populaci objeví přibližně ve stejném počtu jako v populaci původní, nadprůměrní v počtu vyšším a podprůměrní v počtu nižším.

Inovujícím prvkem v celém vývojovém procesu je **změna**, realizovaná pomocí tzv. rekombinačních operátorů. Tyto operátory jsou obvykle dvou typů:

- **mutace m** vytvářející nové individuum „malou“ změnou původního jedince, tj. $(m: S \rightarrow S)$.
- **křížení x** generují jednoho či více jedinců z několika (dvou a více) jedinců – rodičů $(x: S \times \ldots \times S \rightarrow S)$.

Jednotlivé typy evolučních algoritmů se navzájem liší zejména způsobem reprezentace jedinců – implementačními strukturami S.

Po provedení změny se hovoří o tzv. „mezigeneraci“, která označuje množinu tvořenou jak jedinci, kteří byli předmětem změnových operací, tak i jedinci vytvoření změnami. „Náhrada generací“ pak představuje postup (vývojovou strategii), jak z této smíšené množiny „rodičů“ a „potomků“ vybrat množinu, která bude v dalším vývoji považována za novou populaci. V této náhradě je zpravidla zajištěn konstantní rozsah populace. Zpravidla se hovoří o dvou typech vývojových strategií:

- **generační** (*generational evolution*), kdy jde o úplnou náhradu jedné populace populací následující představující analogii životního cyklu jednoletých rostlin.
- **postupné** (*steady state evolution*), při níž změny podstupuje jen malá část populace a rodiče koexistují se svými potomky (model vývoje déle žijících živočichů a či víceletých rostlin).

Obecně se předpokládá, že čím déle evoluční algoritmus běží, tím lepší výsledek bude reprezentován nejlepším jedincem v populaci. Tento předpoklad zdaleka nemusí být pravdivý. O ukončení algoritmu rozhoduje zastavovací pravidlo.

5.2.2 Ohodnocení jedinců a selekce

Každému jedinci je přiřazeno jeho ohodnocení, neboli kvalita (fitness). Určení kvality je pochopitelně závislé na řešené úloze. V případě, že bude zapotřebí nalézt maximum reálné funkce f(x) bude přirozené považovat za ohodnocení funkční hodnotu této účelové funkce.

Úkolem selekce je upřednostňovat kvalitnější jedince před horšími. Operátor selekce vytváří novou populaci $G(t_v+1)$ výběrem jednotlivců s možným opakováním ze staré populace $G(t_v)$. Výběr může být proveden několika způsoby. Nejběžnější je náhodný výběr pomocí rulety (*roulette wheel selection*). Selekce jedinců představuje významnou část genetických

algoritmů. Výběr jedinců do reprodukčního procesu musí na jednu stranu dostatečně upřednostňovat jedince s vyšší hodnotou fitness, na druhou stranu musí novou populaci vybrat dostatečně různorodou. Jestliže selekční algoritmus nesplňuje jeden z těchto požadavků, vede to v prvním případě k pomalé konvergenci algoritmu, ve druhém k tzv. předčasné konvergenci do lokálního optima funkce. Selekční intenzita nebo též selekční tlak je vyjádřen následujícím vztahem:

$$I = \frac{\overline{M^*} - \overline{M}}{\overline{\sigma}}, \tag{44}$$

kde $\overline{M}$ označuje průměrnou hodnotu fitness v populaci před selekcí, $\overline{M^*}$ průměrnou hodnotu fitness po selekci a $\overline{\sigma}$ je rozptyl fitness hodnot před selekcí. Čím vyšší je selekční tlak, tím rychleji algoritmus konverguje, současně však vzrůstá nebezpečí předčasné konvergence. Pro tuto situaci byl zaveden termín *takeover time*, který označuje počet generací, které jsou zapotřebí, aby selekce zaplnila celou populaci N jedinců nejlepším chromozómem při neúčasti rekombinačních operátorů.

Ztráta variability je (*lost of diversity*) je měřítkem ztráty „genetického materiálu“. Během selekce není část chromozómů z populace vybrána. Tyto chromozómy však také obsahují informaci. Právě jejich ztráta zvyšuje riziko předčasné konvergence genetického algoritmu. Ztráta variability p_d je poměr chromozómů, které nebyly vybrány k celkovému počtu chromozómů v populaci.

Selekčních algoritmů a jejich modifikací je celá řada. Nejčastěji používané algoritmy, které poskytují použitelné výsledky jsou následující:

- proporcionální selekce (roulette wheel selection),
- truncation selekce,
- lineární ranking,
- exponenciální ranking,
- tournament selekce.

Proporcionální selekce

Byla první algoritmem pro selekci jedinců. Pravděpodobnost výběru i-tého jedince je dána následující pravděpodobnosti:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=0}^{N} f_j}. \tag{45}$$

Závislost pravděpodobnosti výběru na velikosti fitness f_i může působit i negativně. Vyskytne-li se v populaci jedinec s relativně vysokým ohodnocením (ve srovnání s ostatními), je populace postupně nahrazena tímto jediným chromozómem.

Tournament selekce

Tento algoritmus dosahuje velmi dobrých výsledků. Jeho největším přínosem je absence požadavků na setřídění populace a jednoduchost vlastní selekce. Z tohoto důvodu je tournament selekce často používaná. Překlad anglického názvu tournament je soutěž nebo turnaj. Přesně v tomto duchu selekce probíhá – z N jedinců populace je vybráno t soutěžících. Do další generace postupuje nejlepší z těchto t jedinců. Celý postup se opakuje N-krát, kde N je počet jedinců v nové populaci.

Časová náročnost algoritmu je O(N). Pokud by populace byla seřazena podle hodnoty fitness tak, aby nejhorší jedinec měl index 1 (tj. $f(J_1) \leq f(J_2) \leq \ldots \leq f(J_N)$), potom pravděpodobnost p_j, že jedinec s indexem j bude vybrán je určena:

$$p_j = N^{-t_T} \cdot (j^{-t_T} - (j-1)^{t_T}), \text{ kde } 1 \leq j \leq N. \tag{46}$$

Ztráta variability p_d závisí pouze na parametru t_T (tj. počtu mezi sebou soupeřících jedinců).

$$p_d = t_T^{-\frac{1}{t_T-1}} - t_T^{\frac{t_T}{t_T-1}}. \quad (47)$$

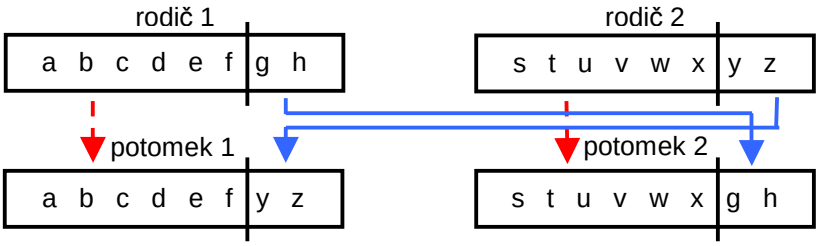
Při velikosti $t_T = 5$ je během jedné generace ztracena přibližně polovina populace. Nejčastěji bývá používan tournament s $t_T = 2$ (*binary tournament*).
Popis ostatních selekčních algoritmů, tj. truncation selekce, lineární ranking a exponenciální ranking lze najít v [Ošmera, 2001].

Elitismus
Předešlé techniky obecně nezaručují postup nejlepšího jedince do nové generace. Zvláště v malých populacích je tato ztráta vnímána velmi negativně. Experimenty prokázaly, že ztráta nejlepších jedinců může být opakována a znovuvytvoření jedince není automatické.
Elitismus je jednoduchá technika, kterou je vybrán určitý (např. je vybrán pouze jeden) počet nejlepších jedinců a ti se nepodrobují selekčnímu tlaku, ale postupují do nové generace přímo.

5.2.3 Změnové (rekombinační) operátory

Selekce je sice mohutný nástroj pro zlepšování kvality populací, avšak jejím důsledkem je pouhé kopírování jedinců. Noví jedinci ve vývojovém procesu vznikají pouze na základě změnových operátorů. Základními změnovými operátory (rekombinační operátory) GA jsou křížení a mutace. Ne všichni selektování jedinci však musí projít těmito genetickými operacemi. Jedinci jsou pro tyto operace vybírání opět náhodně s jistými pravděpodobnostmi. Konkrétně jde o pravděpodobnost křížení $P_\times$ (obvykle v rozsahu 0,6 - 1) a pravděpodobnost mutace P_m (poměrně malá 0,05 – 0,15). Tyto dvě hodnoty jsou dalšími parametry GA.

Křížení
Operátor křížení (*crossing over*) je charakteristický pro GA a představuje pro ně základní operátor pro evoluci populace. Zastánci GA vyzdvihují obvykle přínos křížení pro výměnu informací mezi jedinci. Odpůrci GA naopak považují křížení za „rozbíjení“ bloků bitů a operátor křížení aplikují stejně jako mutaci s velmi malou pravděpodobností. Teorie stavebních bloků (*building blocks*) vysvětluje konvergenci GA [Goldberg, 1989].
Existuje celá řada variant křížení. Základem je náhodný výběr dvojice jednotlivců, u kterých dochází k výměně genové informace tak, že od bodu křížení dojde k výměně genů. Často se tato operace neprovádí se 100% pravděpodobností, ale např.s pravděpodobností okolo 95%.
Bodové křížení je nejjednodušší způsob rekombinace chromozómů. Vychází z biologické analogie, kdy se rekombinace genů může uskutečnit v jednom nebo více bodech chromozómu. U jednobodového křížení jsou ve vybraném místě části rodičů navzájem vyměněny. Vzniknou tak dva potomci, z nichž každý obsahuje části genetických informací z obou rodičů. U vícebodového křížení dochází k výměně více úseků chromozómů obou rodičů. U některých potomků může dojít ke zvýšení fitness funkce. Tito jedinci se díky svojí kvalitě dostanou během další selekce do nové populace, a to se zvýšenou četností (dle použitého selekčního mechanismu).
Jednotné křížení (*uniform crossover*) představuje další alternativu rekombinačního operátoru. Tento operátor prochází celé chromozómy o délce n genů a provádí výměnu jednotlivých genů s pravděpodobností p_{uc}. Jednotné křížení bylo odmítáno pro příliš velké „rozvracení“ kódu podle teorie stavebních bloků. Na druhé straně může jednotné křížení přinést do populace žádanou různorodost a tím je GA vhodný při řešení složitých vícerozměrných funkcí s mnoha lokálními extrémy. Jednotné křížení je silnou zbraní v boji proti předčasné konvergenci algoritmu. Uvedené druhy křížení představují nejpoužívanější způsoby rekombinace. Podle [Fogel, 1995] je nejúčinnější jednotné, následuje dvoubodové a poslední je jednobodové křížení.



Obr. 13 Jednobodové křížení

Mutace

Druhým genetických operátorem je mutace. Ta má ve standardních GA velmi jednoduchou základní podobu. Nad každým bitem v celé populaci (a těch je N·L) je proveden náhodný experiment s pravděpodobností úspěchu rovnou P_m. Vyjde-li pozitivní výsledek, pak bude příslušný bit invertován. Mutace je pro GA zdrojem nových informací. Příliš velká pravděpodobnost mutace P_m způsobuje nestabilitu vývoje populace a příliš malá mutace nedokáže přinášet dostatek nových informací pro další vývoj.

5.3 Varianty genetických algoritmů

Zpočátku byla velká pozornost věnována různým variantám standardního GA, tj. vlivu různých variant základních operátorů selekce, křížení a mutace. Velice důležité je zakódování problému pomocí jednotlivých genů. Geny mohou být bity, celá čísla nebo reálná čísla.

Standardní GA jsou variantou GA s reprezentací chromozomů bitovými řetězci fixní délky, tvořených dvouhodnotovými symboly (zpravidla 0 a 1), selekcí ruletovým kolem a jednoduchými rekombinačními operátory.

Cílem optimalizace může být nalezení maxima nebo minima účelové funkce. Dosahované výsledky optimalizace též silně závisí na nastavení parametrů GA, tj. velikosti populace, pravděpodobnosti křížení, pravděpodobnosti mutace atd. Může být použita i tzv. metaoptimalizace, kdy nastavení parametrů GA je nastavováno např. jiným GA ve vyšší vrstvě nebo pomocí fuzzy pravidel [Matoušek at al., 2000]. Běžně se počáteční populace generuje náhodně. Pro urychlení výpočtu je velice výhodné generovat počáteční populaci pomocí heuristik, tj. využít maximální informace o řešeném problému [Ošmera, 1997].

Velkou skupinu GA tvoří tzv. hybridní GA, kdy se kombinují jiné známé metody s GA. Jinou variantou je hierarchická struktura GA, kdy se na nejnižší úrovni GA nacházejí skupiny paralelně běžících negenetických metod [Ošmera, 1995].

Pokud jsou řešeny velice obtížené a časově náročné problémy optimalizace, je výhodné použít paralelní GA (PGA). Velmi výrazným zlepšením klasického GA je zavedení operátoru migrace, který urychluje nalezení globálního extrému řešené úlohy.

Další variantou algoritmu je víceúrovňový distribuovaný GA [Ošmera at al., 1995]. V této variantě je spuštěno současně několik GA (s různou počáteční populací, s různě nastavenými parametry, s různou implementací). Za řešení úlohy se považuje řešení dosažené algoritmem hierarchicky nejvyšší úrovně. Porovnání časové náročnosti výpočtu, resp. počtu iterací potřebných k nalezení řešení „obyčejným“ a distribuovaným GA (počet iterací se u víceúrovňových distribuovaných GA stanovuje podle počtu iterací provedených algoritmem v nejvyšší hierarchické úrovni) výrazně hovoří ve tohoto uspořádání. Dalším vhodným operátorem může být zavedení omezené doby života jedinců v populaci [Roupec, 2001].

V současné době existuje velký počet dalších variant GA, které jsou aplikovány k řešení nejrůznějších problémů. Vznikají např. „kulturní“ nebo „memové“ algoritmy. Dále lze s různým způsobem s GA kombinovat fuzzy logiku a neuronové sítě. Parametry GA lze adaptivně nastavovat v průběhu výpočtu GA pomocí fuzzy pravidel [Matoušek at al., 2000]. Nadějné se zdají např. Bayesovské algoritmy [Pelikán, 1999]. Zvláštní skupinu tvoří GA pro vícekriteriální optimalizaci. Další skupinu tvoří messy GA [Kvasnička at al., 2000], multiploidní GA, DNA algoritmy atd.

6. Dílčí výsledky

V následující části jsou uvedeny výsledky optimalizace třísekčního progresivního rozdělovače ZP-A získané v programu **GenetikaRozdělovač_II**, reogramy ekologických plastických maziv, experimentální výsledky toku plastických maziv v trubicích kruhového průřezu včetně jejich srovnání se simulovanými průběhy. Dále jsou zde uvedeny výsledky simulace progresivního rozdělovače PRB při nerovnoměrném tlakovém zatížení jeho vývodů a popis simulačního modelu, který byl vytvořen v programu DYNAST.
Uvedené výsledky budou spolu s údaji od různých výrobců mazací techniky dále využity k programovému zpracování optimalizace.

6.1 Program GenetikaRozdělovač_II

Program **GenetikaRozdělovač_II** byl vytvořen k optimalizaci třísekčního progresivního rozdělovače ZP-A dle zadaných požadavků, kterými jsou:
- počet otevřených vývodů rozdělovače z celkového počtu všech vývodů,
- stanovení požadovaného poměru dělení maziva prostřednictvím zadání mazacích dávek u otevřených vývodů rozdělovače.

Předmětem optimalizace je nalezení takových konstrukčních variant rozdělovače, které mají odpovídající počet sekcí, otevřených vývodů a rozdělují vstupující mazivo co nejblíže požadovanému poměru.
V programu je implementován genetický algoritmus a jeho zpracování je provedeno v objektově orientovaném jazyku JAVA [Herout, 2000], [Keogh, 2005]. Po úpravě parametrů programu je možné dle zadaných požadavků optimalizovat i další typy rozdělovačů, např. ZP-B, ZP-C, ZP-D [Delimon] a PRA, PRB [Tribotec] a další typy od jiných výrobců.

6.1.1 Zakódování a ohodnocení varianty rozdělovače ZP-A

K tomu, aby bylo možné použít genetický algoritmus k optimalizaci, bylo zapotřebí najít vhodný způsob kódování konstrukční varianty rozdělovače ZP-A. Tomuto problému optimalizace nejlépe vyhovuje celočíselné kódování.
Každou sekci rozdělovače ZP-A je tedy možné zakódovat šesti celými čísly, tzn., že třísekční rozdělovač bude kódován řetězcem o délce osmnácti číslic. Způsob kódování je zřejmý z tab. 1.

vlastnost sekce	A_s	B_s	C_s	D_s	E_s	F_s
kód	x	x	x	x	x	x

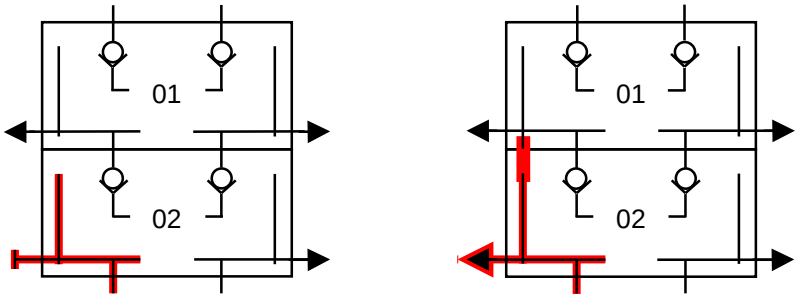
Tab. 1 Zakódovaná informace o sekci rozdělovače ZP-A

První číslice kódu, charakterizující vlastnost A_s sekce, může u rozdělovače ZP-A nabývat celočíselných hodnot v rozsahu 1 až 4 a u vlastností B_s až F_s jsou hodnoty kódu rovny 0 nebo 1. Tzn., že je buď určité propojení vnitřních kanálků v rozdělovači otevřeno nebo je uzavřeno. Význam vlastností A_s až F_s je uveden v tab. 2.

vlastnost sekce	**popis vlastnosti sekce**
A_s	velikostní řada sekce (1 = 0,07; 2 = 0,1; 3 = 0,2; 4 = 0,3 cm^3/zdvih)
B_s	propojení vývodů sekce přes můstek (0 = ne, 1 = ano)
C_s	otevření průběžného kanálu – levá strana (0 = ne, 1 = ano)
D_s	otevření průběžného kanálu – pravá strana (0 = ne, 1 = ano)
E_s	otevření levého vývodu sekce (0 = ne, 1 = ano)
F_s	otevření pravého vývodu sekce (0 = ne, 1 = ano)

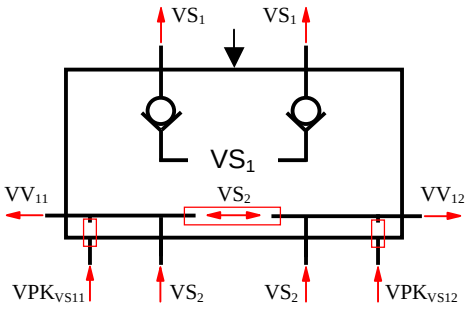
Tab. 2 Význam číselného kódování sekce rozdělovače ZP-A

V průběhu výpočtu programu nemusí být generovány pouze funkční konstrukční varianty rozdělovače ZP-A. Může se stát, že jsou vytvořeny celočíselné kombinace představující varianty, které jsou buď neprůchodné, obr. 14a, anebo nespolehlivé co do velikosti dodávky maziva, obr. 14b. Každý vygenerovaný kód je proto před dalším zpracováním v programu kontrolován a případné chybné úseky kódu jsou opraveny. U propojení sekcí dle obr. 14b by nebylo zřejmé, kolik maziva je vytlačováno z konkrétního vývodu.



Obr. 14 Schéma neprůchodného (a) a nespolehlivého (b) propojení sekcí rozdělovače ZP-A

Vztahy pro stanovení mazacích dávek a tím i poměru dělení maziva v rozdělovači jsou patrné z obr. 15. Uvedené veličiny představují objemy maziva, které buď do sekce vstupují a nebo jsou z ní vytlačeny za jeden pracovní cyklus rozdělovače.



Obr. 15 Objemy maziva vstupující a vystupující ze vstupní sekce rozdělovače ZP-A

Objemy maziva vytlačené z vývodů vstupní sekce za jeden pracovní cyklus rozdělovače lze vypočítat z následujících vztahů:

$$VV_{11} = E_s \cdot \left(VS_2 + VPK_{VS11} \cdot C_s + VS_2 \cdot B_s + VPK_{VS12} \cdot B_s \cdot D_s\right) \tag{48}$$

a

$$VV_{12} = F_s \cdot \left(VS_2 + VPK_{VS11} \cdot D_s + VS_2 \cdot B_s + VPK_{VS12} \cdot B_s \cdot C_s\right). \tag{49}$$

Objemy maziva, které vstupují do průběžných kanálů sekce jsou určeny pomocí těchto vztahů:

$$VPK_{VS11} = VPK_{VY21} \tag{50}$$

a

$$VPK_{VS12} = VPK_{VY22}. \tag{51}$$

Veličiny VS_1 a VS_2 představují objemy pracovních komor vstupní a navazující pracovní sekce. Veličiny VPK_{VY21} a VPK_{VY22} jsou objemy maziva vytlačené z průběžných kanálů následné pracovní sekce. Za symboly C_s, D_s, E_s a F_s jsou dosazeny číselné hodnoty kódu vstupní sekce, viz tab. 2. Analogicky vypočítá program mazací dávky u dalších sekcí.

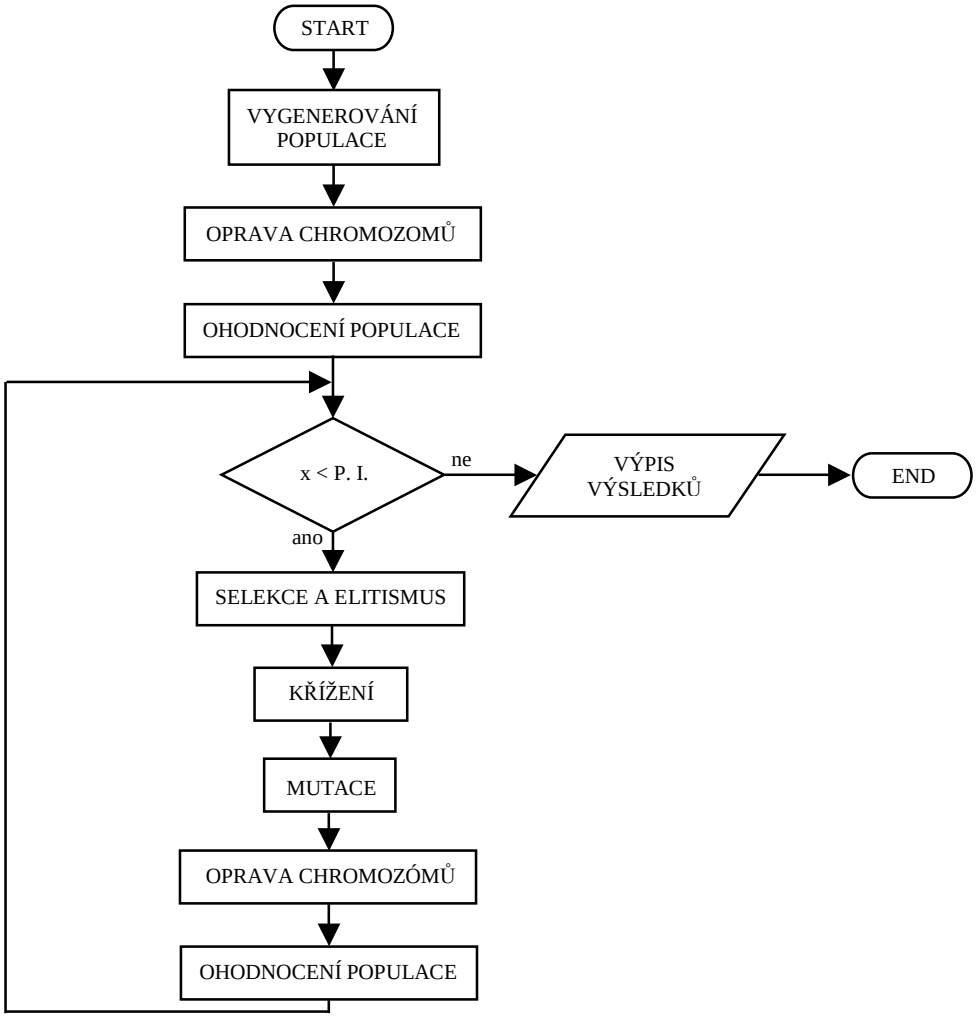
Dalším důležitým parametrem programu je hodnotící funkce (fitness). Porovnávají se požadované mazací dávky s vypočítanými, které jsou vytlačené z rozdělovače během jednoho pracovního cyklu. Tím je také sledován požadavek na poměr dělení maziva. Do další generace jsou vybírány konstrukční varianty způsobem, který je dán mechanismem selekce, kap. 5.2.2. Hodnotící funkce má následující podobu

$$HF = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{2} abs(VV_{Pij} - VV_{Vij}), \tag{52}$$

kde: VV_{Pij} – požadovaný objem maziva vytlačený z i-té sekce j-tého vývodu rozdělovače za jeden pracovní cyklus [cm^3/cyklus], VV_{Vij} – vypočítaný objem maziva z i-té sekce j-tého vývodu rozdělovače [cm^3/cyklus] pro $i \in \langle 1;n \rangle$ a $j \in \langle 1;2 \rangle$, kde n je počet sekcí.

6.1.2 Algoritmus programu GenetikaRozdělovač_II

Algoritmus programu GenetikaRozdělovač_II je zobrazen prostřednictvím vývojového diagramu na obr. 16.



Obr. 16 Vývojový diagram programu GenetikaRozdělovač_II

Počáteční populace je programem GenetikaRozdělovač_II vytvořena generátorem pseudonáhodných celých čísel a je uložena v dvojrozměrném poli. Velikost pole je dána počtem N prvků v populaci a délkou chromozómů L.

Vygenerované chybné části kódu populace jsou dále programem opraveny a uloženy v novém dvojrozměrném poli, viz kap. 6.1.1
Každému prvku populace je poté stanovena hodnotící funkce dle (52). Ta představuje součet absolutních odchylek mezi požadovanými a vypočítanými mazacími dávkami z každého otevřeného vývodu rozdělovače.
K selekci nové populace ze stávající byl zvolen turnajový mechanismus, který je popsán v kap. 5.2.2. Hlavním důvodem je jednoduchost programové implementace při zachování kvality selekčního tlaku. Selekční tlak lze jednoduše měnit počtem jedinců t_T, kteří jsou vybíráni do turnaje.
Z populace před selekcí je vybrán jedinec s nejlepší hodnotou fitness, který v selektované populaci nahradí prvního nalezeného jedince s horší hodnotou fitness. Tím je zaručeno, že i navzdory selekci populace postoupí vždy nejlepší jedinec (elitismus), kap. 5.2.2.
Ke křížení jedinců v populaci byl vybrán mechanismus jednobodového křížení, který je popsan v kap. 5.2.3. Pravděpodobnost křížení P_x byla záměrně snížena, protože se ukázalo, že k vytváření nových jedinců v populaci postačuje změnový operátor mutace.
Mutace každého bitu populace je provedena s pravděpodobností P_m. Princip mutace je vysvětlen v kap. 5.2.3.
Po ukončení výpočtů je proveden výpis výsledků. Jedná se o výpis průměrných hodnot fitness a jejich rozptylu v populaci (z každé iterace), výpis nejlepších nalezených variant (z každé iterace je vybrána jedna) a jejich hodnocení.

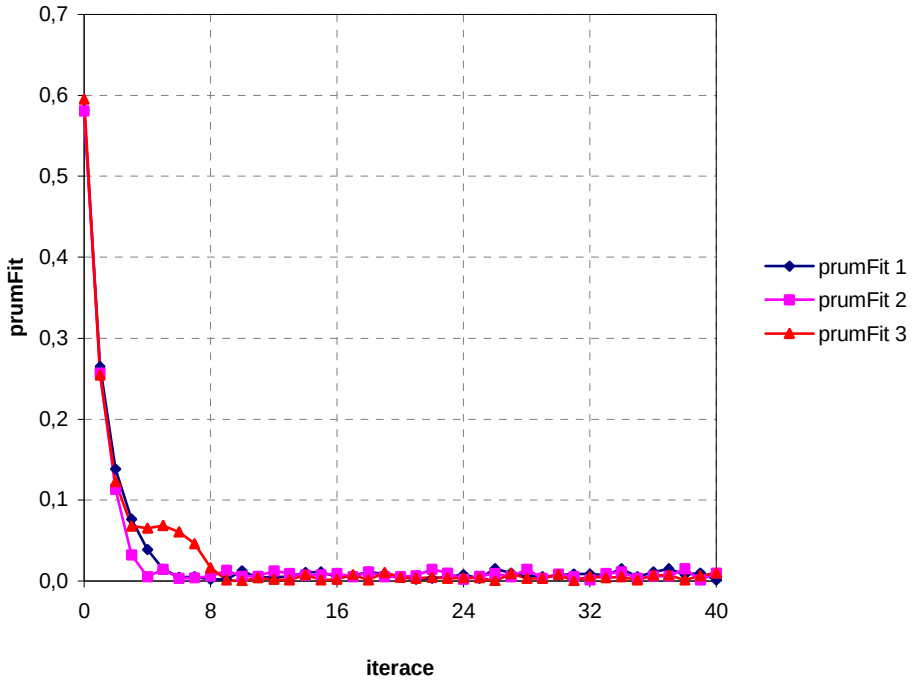
6.1.3 Výsledky optimalizace rozdělovače ZP-A

Program GenetikaRozdělovač_II byl ověřen při optimalizaci průtokových poměrů v třísekčním rozdělovači ZP-A, obr. 17-21, tzn. k nalezení takových vhodných konstrukčních variant rozdělovače, které splňují následující požadavky:
- rozdělovač musí mít tři otevřené vývody z celkového počtu šesti vývodů (nezáleží, které z nich to budou; pouze jsou vyloučeny případy, při kterých by byly uzavřeny oba vývody vstupní sekce, protože by se jednalo o nefunkční varianty rozdělovače, viz kap. 6.1.2)
- poměr dělení maziva v rozdělovači by měl být 6:1:1 nebo co nejblíže tomuto požadavku (dělení maziva je zadáno prostřednictvím mazacích dávek, které jsou z otevřených vývodů vytlačeny během jednoho pracovního cyklu rozdělovače, tj. [cm^3/cyklus])

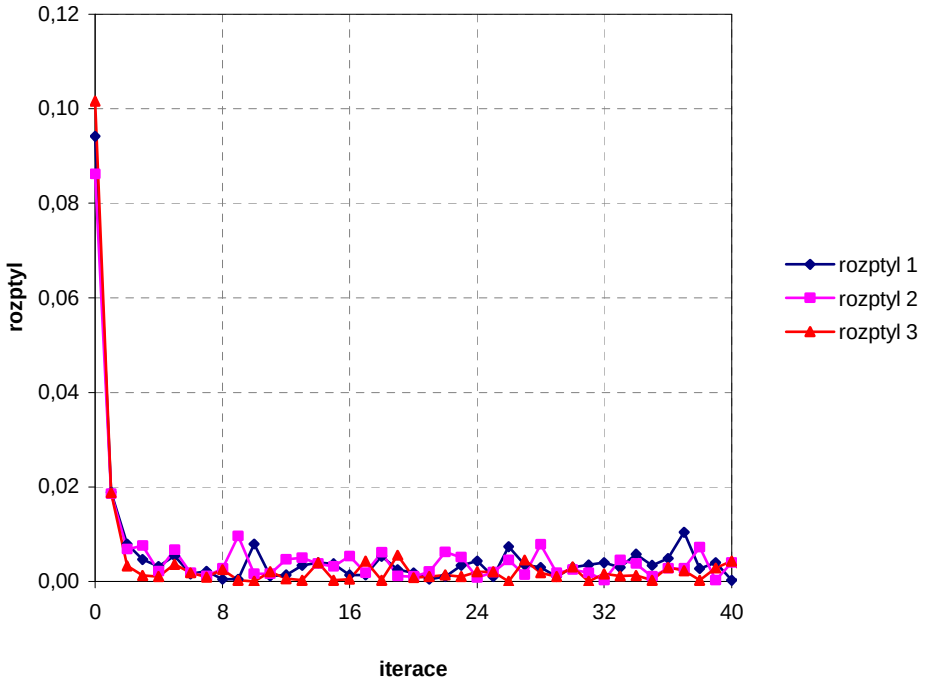
Na obr. 17 jsou znázorněny 3 vypočítané průběhy průměrných hodnot funkcí fitness a tomu odpovídající rozptyl, obr. 18, u populací s 200 jedinci, tj. N = 200.
Do selekce bylo vybíráno vždy 5 jedinců, tzn. $t_T = 5$ a optimální pravděpodobnost mutace byla řadou pokusných výpočtů stanovena na hodnotu $P_m = 1/300$.
Z obr. 17-18 je patrné, že náhodná složka genetického algoritmu má za následek to, že opakovaným výpočtem nelze dosáhnout shodných výsledků, každý výpočet je jedinečný.
Pro padesát opakovaných výpočtů se stejnými vstupními požadavky a parametry GA, jako v předchozím případě, jsou průběhy průměrných hodnot fitness a rozptylu u populace zobrazeny na obr. 19-20. Z těchto vypočítaných hodnot byly stanoveny střední hodnoty.
Z uvedených obr. 19-20 lze usoudit, že k náhradě celé populace nejlepšími jedinci je 40 iterací dostačující.
Výhody optimalizace v programu GenetikaRozdělovač_II oproti ručnímu návrhu rozdělovačů ZP-A jsou následující:
- Program umožňuje podstatně rychlejší návrh rozdělovačů ZP-A. Výpočet programu je otázkou několika vteřin a návrh je spojen pouze se zadáním vstupních požadavků, tzn., že vyhledání vhodných variant a kontrola poměru dělení maziva je záležitostí programu.
- Optimalizací v programu je ověřováno velké množství variant, což není při ručním návrhu možné. Tím je zaručeno, že budou nalezena ta nejlepší řešení. Např. pro třísekční rozdělovač ZP-A se třemi otevřenými vývody je počet všech funkčních variant roven 4352. U rozdělovačů s více sekcemi je již počet variant značně vysoký.

- Program lze snadno upravit k optimalizaci jiných progresivních rozdělovačů a to i s jiným počtem sekcí a otevřených vývodů.
- Změnou účelové funkce (fitness) lze snadno změnit předmět optimalizace nebo jej kombinovat s jiným.

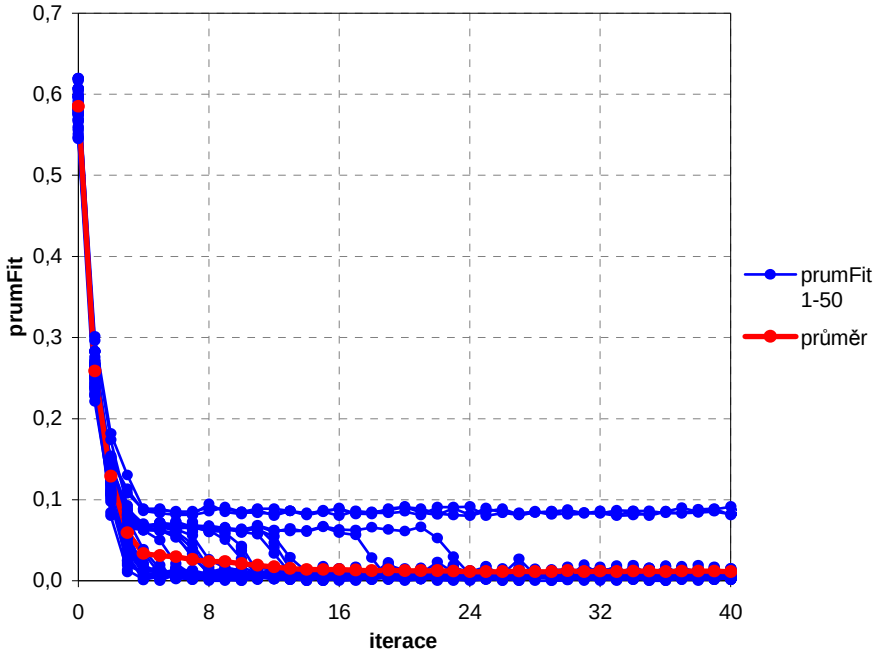
Program GenetikaRozdělovač_II je tedy užitečný nástroj k návrhu progresivních rozdělovačů.



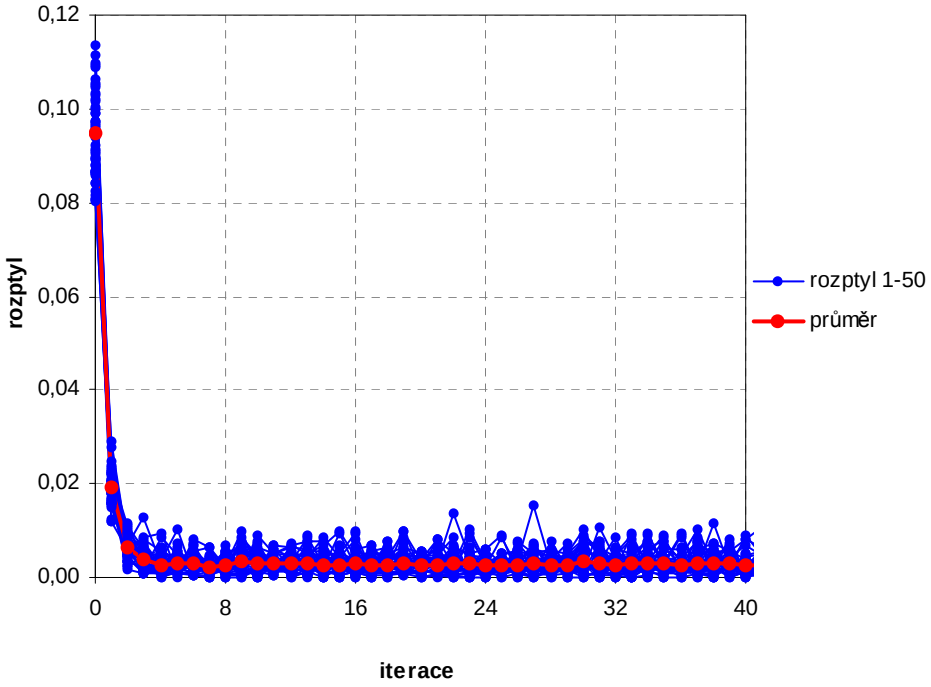
Obr. 17 Průměrná hodnota fitness u populace, (N = 200, t_T = 5, P_m = 1/300)



Obr. 18 Rozptyl u populace, (N = 200, t_T = 5, P_m = 1/300)

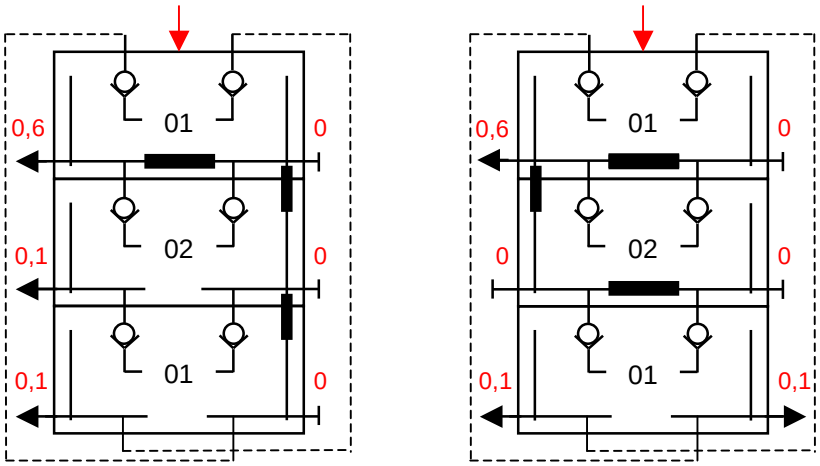


Obr. 19 Průměrná hodnota fitness u populace, (N = 200, t_T = 5, P_m = 1/300)



Obr. 20 Rozptyl populace, (N = 200, t_T = 5, P_m = 1/300)

Na obr. 21 jsou zobrazena dvě z nejlepších nalezených řešení. Čísla u vývodů představují velikost mazací dávky vytlačené na jeden pracovní cyklus z vývodů rozdělovače.
Chromozóm varianty progresivního rozdělovače zobrazeného na obr. 21a má následující podobu (210110300110200010) a kód varianty podle obr. 21b je (211010310000200011).



(a) (b)

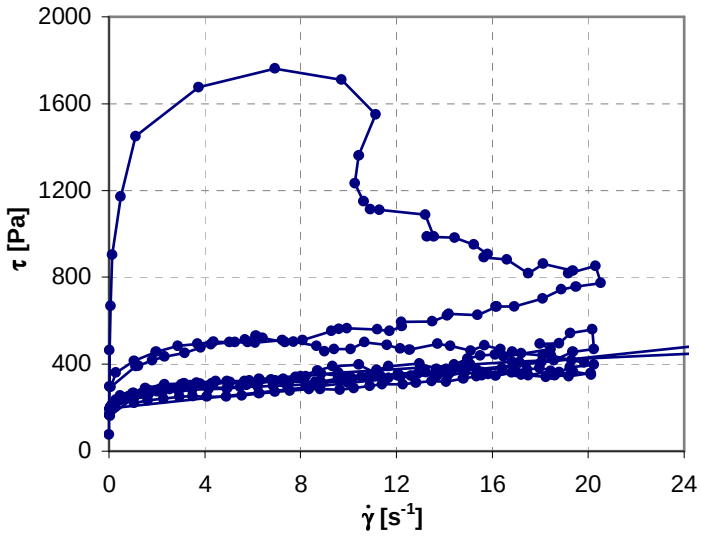
Obr. 21 Varianty rozdělovače ZP-A nalezené prostřednictvím programu GenetikaRozdelovac_II

Hodnotící funkce fitness jsou u obou variant rovny nule ($HF_1 = HF_2 = 0$), tzn., že poměr dělení maziva rozdělovačích odpovídá přesně zadanému požadavku 6:1:1.
Ne vždy se ovšem podaří nalézt takovou variantu, u které by poměr dělení maziva odpovídal přesně zadaným požadavkům.

6.2 Tok plastických maziv

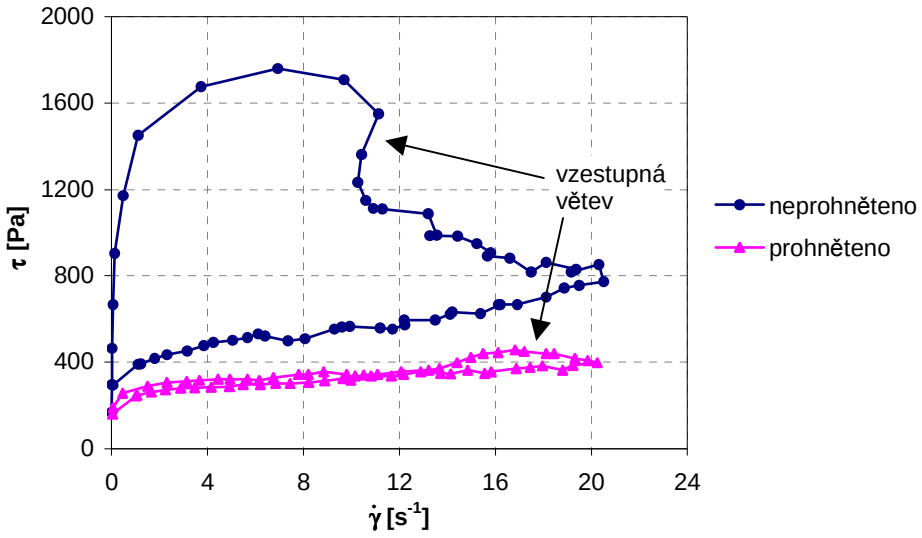
6.2.1 Reogramy ekologických plastických maziv

Jednalo se o proměření tokových křivek u ekologických plastických maziv Plantogel 2S, Plantogel 000S, Mogul EKO L1 a Aralub BAB RC1. Podrobný popis uvedených plastických maziv lze nalézt na internetových stránkách jejich výrobců [Fuchs], [Aral] a [Paramo].
Měření bylo provedeno na reometru typu kužel-deska (Rheostress). Z obr. 22-23 je patrné, že se jedná o skutečné vazkoplastické kapaliny s počátečním napětím τ_f. Počáteční hystereze je vlivem hnětení maziva, tzn. opakovaným měřením dle metodiky Koramo, odstraněna nebo zmenšena. Nejvyšší hysterezi na počátku měření, v neprohněteném stavu, vykazuje mazivo Plantogel 2S, nejmenší Plantogel 000S.



Obr. 22 Reogram ekologického plastického maziva Plantogel 2S, t = 20-20,1°C

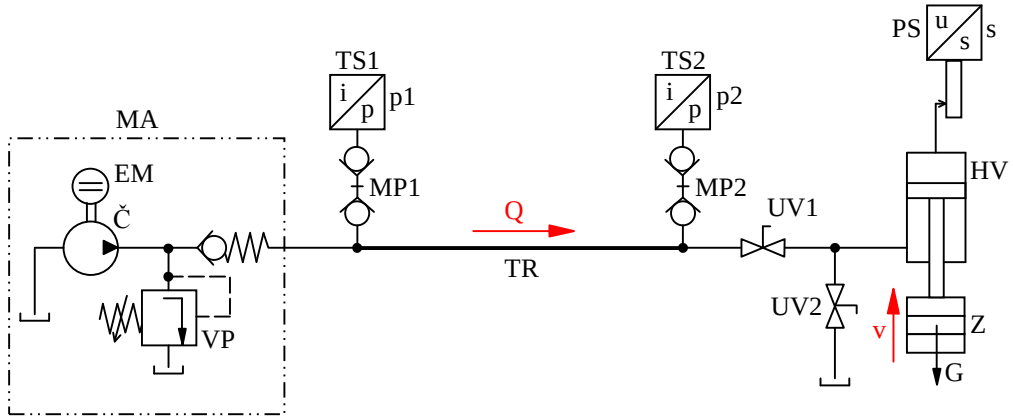
K aproximaci experimentálně naměřených závislostí byly použity reologické modely Bingham a Herschel-Bulkley, kap. 3. Získané konstanty reologických modelů jsou uvedeny v [Zborovská, 2003].
Pro vzestupnou větev prohněteného maziva, viz obr. 23, jsou konstanty Herschel-Bulkleyova modelu následující: τ_f = 190,7 Pa, K = 90 Pa·s^n, n = 0,25. Reogramy a reologické konstanty dalších maziv jsou v [Štern, 2003], [Špaček a Pavlok, 2003], [Nevrlý a Štern, 2005].
Problematika určení počátečního smykového napětí τ_f z naměřených tokových křivek je podrobně řešena v [Czarny, 1992]. Metody výpočtu indexu konzistence u plastických maziv lze najít v příspěvku [Florea, 1999].



Obr. 23 Reogramy ekologického plastického maziva Plantogel 2S, t = 20-20,1°C

6.2.2 Tlakové ztráty ve vedení

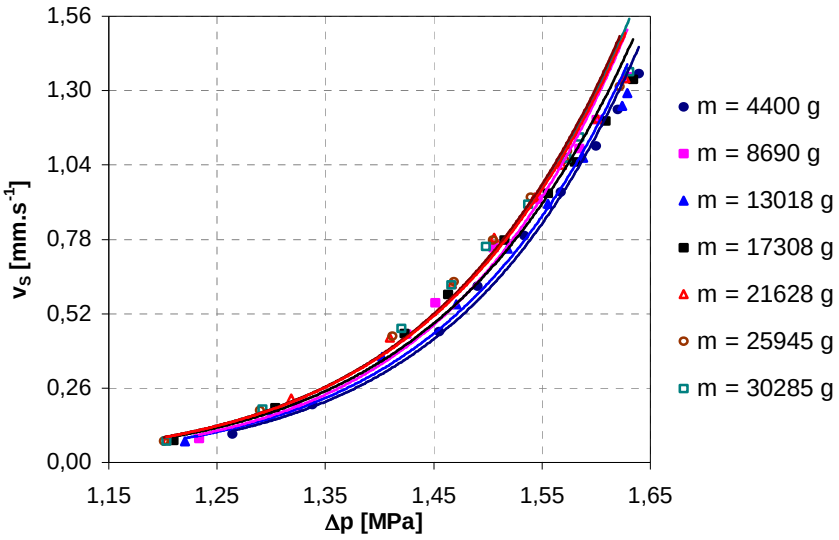
Ke stanovení tlakových ztrát v závislosti na průtoku, tj. Δp = f(Q), ve vedení různých rozměrů byla provedena řada experimentálních měření s ekologickým plastickým mazivem Plantogel 2S. Schéma zkušebního zařízení je na obr. 24.



Obr. 24 Schéma zkušebního zařízení ke stanovení tlakových ztrát ve vedení

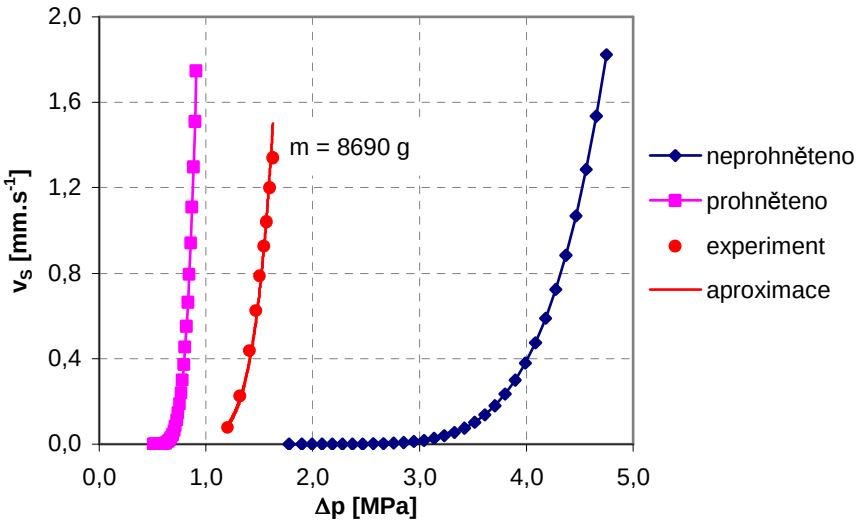
Zkušební zařízení je sestaveno z mazacího agregátu (MA) s čerpadlem ACF 02 (Tribotec) opatřeným pojistným ventilem (VP). Čerpadlo je poháněno stejnosměrným elektromotorem (EM). Dalšími prvky zkušebního zařízení jsou měřicí přípojky (MP), tlakové snímače (TS), snímač polohy (PS), odměrný hydromotor (HV), uzavírací ventily (UV), trubky (TR)

a zátěž (Z). Měřené potrubí měly následující rozměry: vnitřní průměr od ϕ6 do ϕ14 mm, délka 4000 mm.
Naměřené průběhy jsou zobrazeny, jako závislost střední rychlosti na tlakovém spádu $v_s = f(\Delta p)$, obr. 25. Jejich srovnání s vypočítanými průběhy středních rychlostí lze nalézt ve zprávě [Vepřek, 2005c]. Vypočítané střední rychlosti byly stanoveny prostřednictvím vztahů (34) až (36) a reologických konstant [Zborovská, 2003].
Měření, viz obr. 25, bylo provedeno opakovaně, vždy s jinou zátěží (Z) na závěsu odměrného hydromotoru při teplotě t = 18,8-20,1°C.
Zatížením hydromotoru byla nastavena požadovaná hladina tlaku p_2 na výstupu z trubice, která se pro uvedené hodnoty hmotností, obr. 25, pohybovala v rozmezí 0,8 až 4 MPa. Je patrné, že zátěž nemá podstatný vliv na hodnoty středních rychlostí.



Obr. 25 Experimentální průběhy středních rychlostí $v_s = f(\Delta p)$ v trubici ϕ6-4000 mm, plastické mazivo Plantogel 2S, t = 18,8-20,1°C

Na obr. 26 je zobrazeno srovnání jednoho z experimentálně naměřeného průběhu středních rychlosti z obr. 25 s vypočítanými.

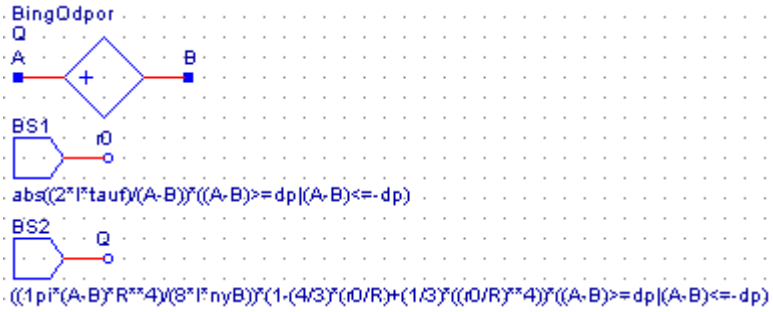


Obr. 26 Porovnání vypočítaných středních rychlostí s experimentem, plastické mazivo Plantogel 2S

Jedná se opět o tok maziva trubici ϕ6-4000 mm. Z obr. 26 je zřejmé, že naměřený průběh leží v pásmu, které je vymezeno průběhy vypočítanými z reologických konstant neprohněteného a prohněteného maziva Plantogel 2S. Reologické konstanty vypočítaných průběhů byly stanoveny aproximací vzestupných větví tokových křivek, viz obr. 23 a je patrné, že naměřený průběh středních rychlostí je blíže průběhu pro prohněteného mazivo.
To může být způsobeno značným prohnětením maziva v hydrogenerátoru a také tím, že se vlivem kapilárních sil na vnitřním povrchu trubice vylučuje více olejové složky maziva, tzn. že tekutost maziva na okrajích trubice může být vyšší.
Přibližnou aproximací experimentálně naměřeného průběhu na obr. 26 byly stanoveny tyto relogické konstanty: τ_f = 290 Pa, K = 210 Pa·s^n, n = 0,25, viz [Vepřek a Nevrlý, 2006], které byly využity při verifikaci simulačního modelu progresivního rozdělovače PRB, kap. 6.2.3.

6.2.3 Simulace toku plastických maziv

K simulaci toku plastických maziv ve vedení mazacího obvodu a vnitřních kanálcích progresivních rozdělovačů byly v programu DYNAST vytvořeny submodely **BingOdpor** [Fiala, 2006] a **BHodpor** [Vepřek a Nevrlý, 2006]. Ty představují odpor proti pohybu binghamské kapaliny a kapaliny typu Herschel-Bulkley.
Submodely jsou složeny z branového prvku **source of volume flow** a blokového prvku **explicit block** [DYNLAB], viz obr. 27. Symboly A a B představují výstupy, kterými lze submodel napojit do simulačního schématu.



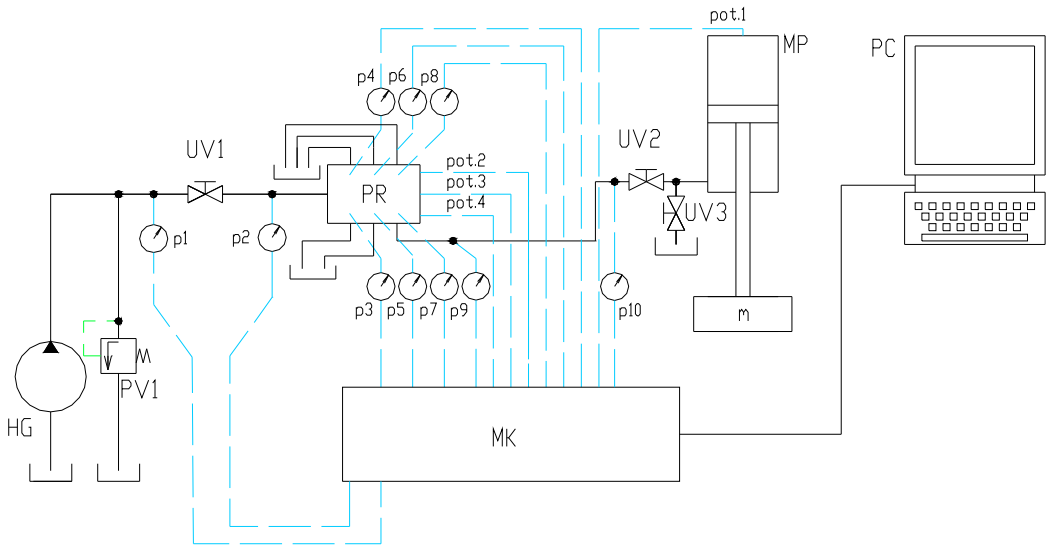
Obr. 27 Submodel BingOdpor

(a) (b)

Obr. 28 Symbolické značky submodelů (a) BingOdpor a (b) BHodpor

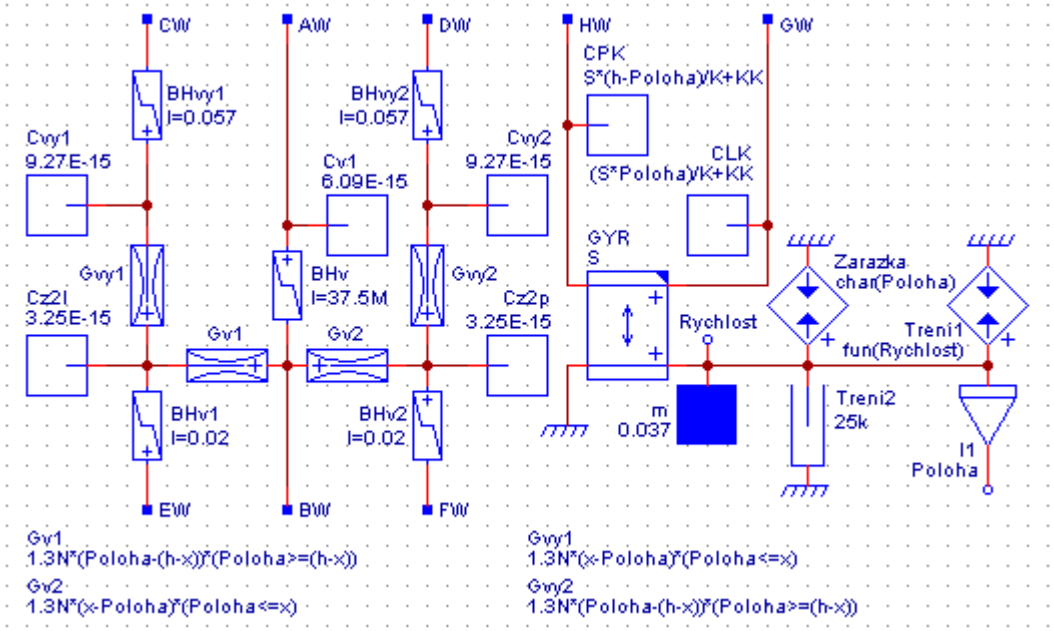
Submodely jsou do simulačního schématu vkládány prostřednictvím vytvořených symbolických značek, viz obr. 28a a obr. 28b. U uvedených submodelů lze modifikovat reologické konstanty maziva a rozměry vedení (vnitřního kanálku prvku). V submodelech jsou implementovány vztahy (24) a (34), kap. 3. Tyto submodely byly využity k simulaci proudových a tlakových poměrů uvnitř progresivního rozdělovače PRB při nerovnoměrném zatížení jeho vývodů [Nevrlý et al., 2005], [Vepřek, 2005a], [Vepřek, 2005b] a k určení tlakového spádu na rozdělovači ZP-A [Fiala, 2006]. Na obr. 29 je uvedeno schéma zkušebního zařízení, pomocí kterého byl zjišťován vliv nerovnoměrného tlakového zatížení vývodů u rozdělovače PRB03. Skládá se z hydrogenerátoru (HG), tj. čerpadlo ACF 02 opatřeným pojistným ventilem (PV1). Čerpadlo je poháněno stejnosměrným elektromotorem.

Dalšími prvky zkušebního zařízení jsou tlakové snímače (p1-p10), snímače polohy (pot1-pot4), odměrný hydromotor (MP), uzavírací ventily (UV1-UV3), a zátěž (m).



Obr. 29 Schéma zkušebního zařízení s progresivním rozdělovačem PRB03 (Tribotec)

K simulaci dějů uvnitř progresivního rozdělovače PRB03 byl nejprve vytvořen submodel pracovní sekce rozdělovače **PRBworkingSection**, viz obr. 30, ve kterém byl implementován submodel **BHodpor**, obr. 28b.



Obr. 30 Submodel pracovní sekce rozdělovače PRB03 (Tribotec), PRBworkingSection

Význam prvků submodelu na obr. 30 je uveden v následujícím přehledu. Nejprve jsou uvedeny odpory proti pohybu:

- **BH_{vy1}, BH_{vy2}, BH_{v}, BH_{v1}, BH_{v2}.**

Vodivosti přestavují otevírání a zavírání toku maziva na zápichu pístu a jsou zavedené, jako lineární funkce polohy pístu. Jejich vztahy jsou uvedeny ve spodní části obr. 30:

- **G_{v1}, G_{v2}, G_{vy1}, G_{vy2}.**

Kapacity vnitřních prostor sekcí rozdělovače jsou stanoveny z vnitřních rozměrů sekcí a z experimentálně stanoveného modulu objemové pružnosti maziva, který má hodnotu $E = 9{,}4 \cdot 10^7$ Pa. Kapacity v submodelu pracovní sekce jsou následující:

- **C_{v1}, C_{vy1}, C_{vy2}, C_{z2l}, C_{z2p}, CPK, CLK**..

Ostatní prvky submodelů:

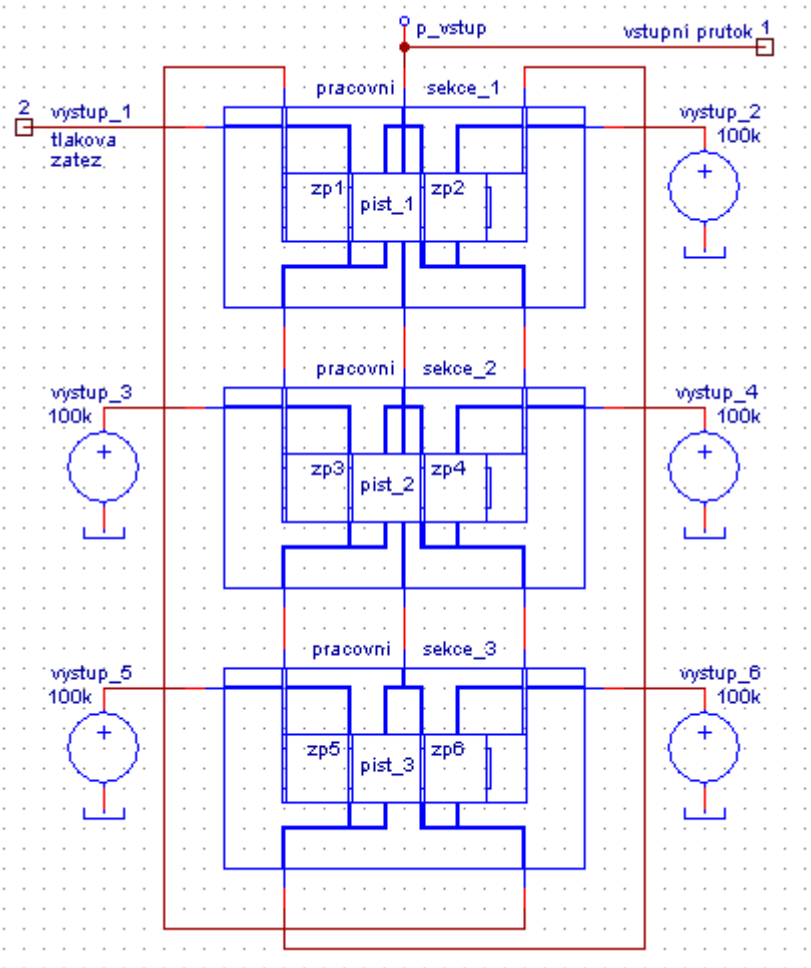
- **GYR, m, Zarazka, Treni1, Treni2, Rychlost, Poloha**.

Výstupy, kterými lze submodel napojit do simulačního schématu jsou:

- **AW, BW, CW, DW, EW, FW, GW a HW**.

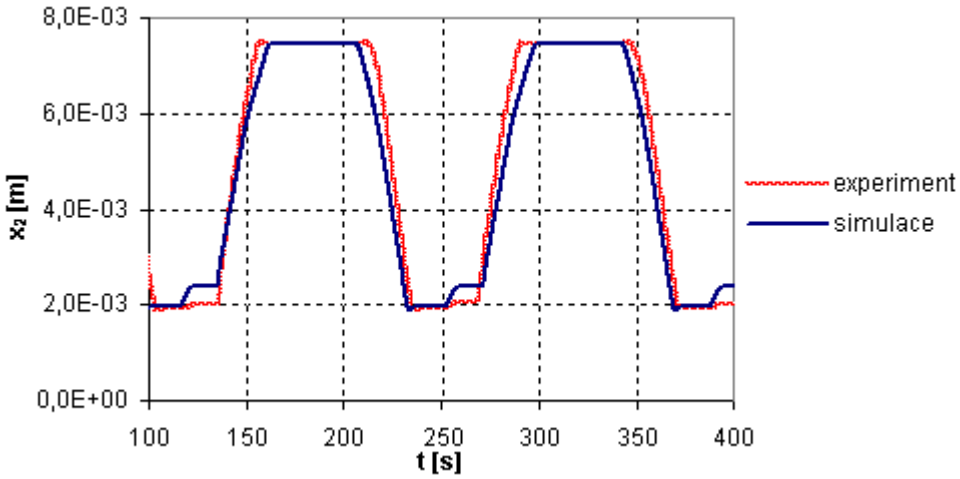
Ze submodelu pracovní sekce bylo vytvořeno simulační schéma rozdělovače PRB03, obr. 31 a zjišťován byl vliv nesymetrického tlakového zatížení výstupů rozdělovače PRB na jeho pracovní cyklus. Na obr. 31 je zatížen výstup 1 u první pracovní sekce rozdělovače. Význam prvků v simulačním schématu na obr. 31 je následující:

- **vystup_i** – výstup maziva z pracovních sekcí progresivního rozdělovače PRB03, pro (i = 2-5) jsou vývody otevřené do atmosféry (p = 100 kPa),
- **p_vstup** – tlak na vstupu do rozdělovače,
- **vstupni prutok** – průtok na vstupu ($Q = 31{,}3.10^{-9}$ $m^3.s^{-1}$), je modelován branovým prvkem *source of volume flow*, který je ve schématu na obr. 31 napojený k místu 1,
- **tlakova zatez** – tlaková zátěž vyvolaná přípravkem na měření průtoku,
- **pist_j** – píst j-té pracovní sekce rozdělovače (j = 1, 2, 3)
- **zp1-6** – zápichy na pístech pracovních sekcí,
- **sekce_k** – submodel sekce *PRBworkingSection* rozdělovače PRB (k = 1, 2, 3).

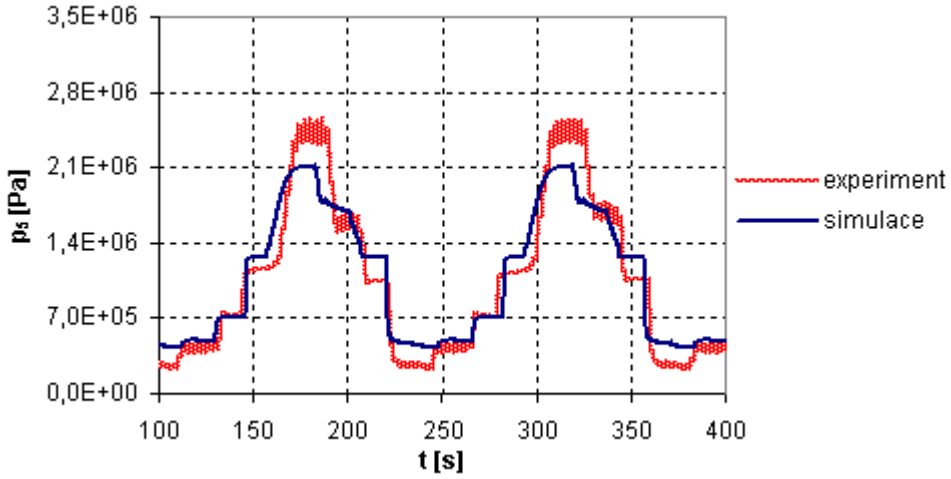


Obr. 31 Simulační schéma progresivního rozdělovače PRB03, nerovnoměrné tlakové zatížení vývodů

Na obr. 32-33 jsou uvedeny výsledky simulace ve srovnání s experimentálním měřením, ze kterých je patrná velikost jejich vzájemné shody. Ukázalo se, že při nesymetrickém zatížení rozdělovače PRB03 nedojíždějí písty do krajních poloh, tzn. že není využit celkový zdvih pístu (max. zdvih 7,45 mm) a vytlačovaný objem maziva je tím snížen o určitou hodnotu.
Tlak na zatíženém výstupu 1 rozdělovače se pohyboval v rozmezí p = (1,27-2,27) MPa v závislosti na tom, zda byl píst druhé pracovní sekce, který vytlačuje mazivo výstupem první pracovní sekce, v klidu nebo v pohybu.
K dosažení vyšší shody mezi výsledky simulace a experimentů by bylo zapotřebí přesnějšího stanovení modulu objemové pružnosti plastického maziva. V důsledku velkého množství nerozpuštěného vzduchu v mazivu je modul objemové pružnosti výrazně závislý na tlaku. Je tedy zapotřebí modul pružnosti stanovit, jako funkci tlaku a nahradit stávající konstantní hodnoty kapacit v simulačním modelu funkcemi tlaku.
K dosažení vyšší shody mezi výsledky experimentů a simulací by bylo také zapotřebí stanovit přesnější hodnoty odporů při toku maziva přes zápichy pístů pracovních sekcí, viz obr. 30.



Obr. 32 Porovnání průběhu polohy pístu 2. pracovní sekce rozdělovače PRB03, simulace - program DYNAST, experiment - program ScopeWin



Obr. 33 Porovnání průběhu tlaku v levé komoře pístu 2. pracovní sekce rozdělovače PRB03, simulace – program DYNAST, experiment - program ScopeWin

7. Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je zdokonalit metodiku projektování centrálních mazacích systémů s progresivními rozdělovači tak, aby byly splněny následující ekologická, technická a ekonomická kritéria:

- úspora a přesnost dodávky maziva ke třecím dvojicím (určeno vlastnostmi dopravovaného maziva, konstrukčním provedením progresivních rozdělovačů, jejich uspořádáním v mazacím obvodu a periodou mazacího cyklu),
- snížení nákladů na pořízení progresivního systému (dáno počtem progresivních rozdělovačů v obvodu a celkovým počtem jejich sekcí),
- rychlost a přehlednost projektování progresivního systému.

K tomuto účelu bude zapotřebí provést řadu experimentálních měření s vybranými plastickými mazivy. Výsledky experimentů budou s výsledky reometrických měření použity při tvorbě a verifikaci simulačních modelů prvků progresivních systémů. Prostřednictvím simulačních modelů budou vypočítány průběhy tlakových ztrát za různých podmínek, tj. průtok, teplota, druh maziva apod. Dále budou stanoveny časové průběhy průtoku maziva při rozběhu a doběhu sloupce plastického maziva ve vedení. Tyto průběhy budou aproximovány vhodnými matematickými vztahy.

Získané aproximační vztahy a údaje od různých výrobců mazací techniky, např. Delimon, Tribotec, Vogel apod. budou implementovány do programu, který bude vytvořen k optimalizaci progresivních systémů. Jádrem programu bude genetický algoritmus a programové zpracování optimalizace bude provedeno v objektově orientovaném jazyku JAVA. Ke snadnému a přehlednému ovládání programu bude vytvořeno grafické uživatelské rozhraní.

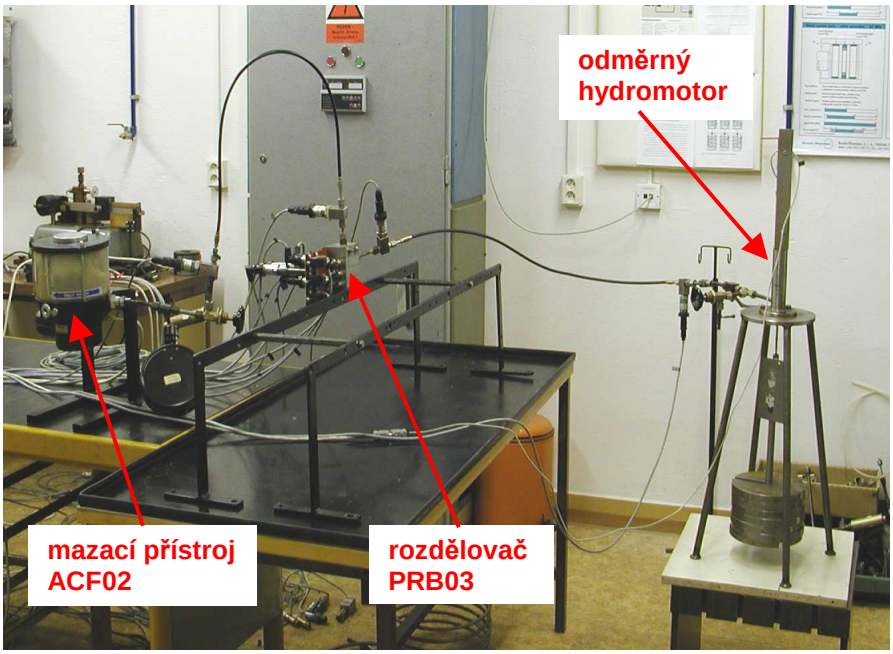
K experimentálním měřením s ekologickými plastickými mazivy různých konzistencí, tj. Plantogel 2S, Plantogel 000S, Mogul EKO L1, Aralub BAB RC1, bude použit měřicí software ScopeWin a k simulaci software DYNAST.

Předpokládané dílčí cíle jsou následující:

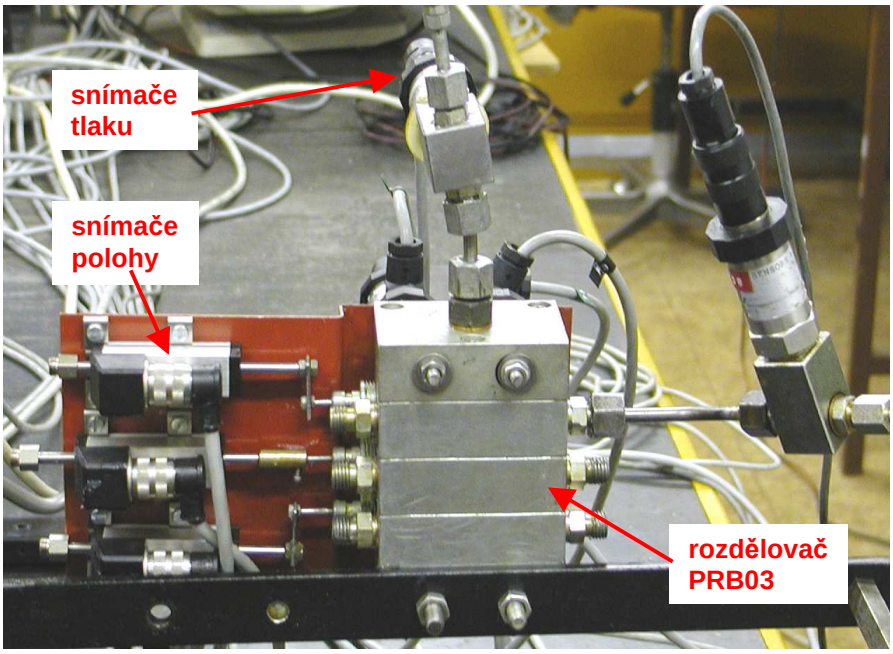
- určení objemového modulu pružnosti u výše uvedených plastických maziv (třída konzistence maziv dle NLGI od 00/000 do 2),
- experimentální stanovení tlakových ztrát $\Delta p = f(Q, t)$ při stacionárním toku plastických maziv ve vedení (ocelové přímé trubice ϕ6 až ϕ14-4000 mm, schéma experimentálního zařízení je na obr. 24),
- stanovení průtokových a tlakových poměrů při rozběhu a doběhu sloupce maziva ve vedení (pro různé trubice a plastická maziva; experimentální stend bude obdobou zařízení na obr. 24).
- proměření tlakových ztrát $\Delta p = f(Q, t)$ na vybraných progresivních rozdělovačích při stacionárním toku plastických maziv (schéma experimentálního zařízení bude podobné tomu, co je zobrazeno na obr. 29),
- tvorba a úprava stávajících simulačních modelů vedení, progresivních rozdělovačů a jejich verifikace dle výsledků experimentů a reometrických měření,
- výpočet tlakových ztrát prostřednictvím simulačních modelů vedení a progresivních rozdělovačů (vypočítané závislosti budou aproximovány vhodnými matematickými vztahy),
- stanovení časových konstant, tlakových a průtokových poměrů při rozběhu a doběhu sloupce maziva pomocí simulačních modelů vedení (aproximace vypočítaných průběhů),
- tvorba programu na optimalizaci progresivních mazacích obvodů - implementace získaných aproximačních vztahů a údajů od různých výrobců mazací techniky, stanovení způsobu zakódování a ohodnocení optimalizačního problému, ladění programu, tvorba grafického uživatelské prostředí programu,

Řešení úkolů disertační práce bude konzultováno s firmami Špondr a Tribotec, které jsou dodavateli kompletních systémů centrálního mazání.

Příloha



Obr. 34 Tribologická laboratoř – Odbor fluidního inženýrství V. Kaplana, měřicí trať ke stanovení vlivu nerovnoměrného tlakového zatížení na pracovní cyklus rozdělovače PRB03 (Tribotec)



Obr. 35 Zapojení snímačů tlaku a polohy na progresivním rozdělovači PRB03 (Tribotec), zjišťování vlivu nerovnoměrného tlakového zatížení na pracovní cyklus rozdělovače

Literatura

ARAL. *Aral Lubricants CR, s. r. o.-Bezpečnostní listy - průmysl.* [online]. [citováno 5. 8. 2006]. Dostupné z URL <http://www.aral.cz/bl-prumysl.php>

BOHÁČEK, F. a kol. *Části a mechanismy strojů II*. Brno: PC-DIR, 1996. 215 s. ISBN 80-214-0829-4.

BRDIČKA, M. - SAMEK, L. - SOPKO, B. *Mechanika kontinua*. Praha: Academia, 2000. 799 s. ISBN 80-200-0772-5.

CZARNY, R. *Smary plastyczne*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004. 287 s. ISBN 83-204-3020-8.

CZARNY, R. *Badania zjawisk związanych z przepływem smarów plastycznych w układach smarowniczych*. Wroclaw: Wydawnictwo Politechniki Wroclawskiej, 1992. 143 s. ISSN 0324-962X.

DASGUPTA, D. - MICHALEWICZ, Z. *Evolutionary Algoritms in Engineering Applications*. Springer, Berlin 1997.

DELIMON. *Delimon Centralized Lubrication*. [online]. [citováno 11. 9. 2006]. Dostupné z URL <http://www.delimon.de/english/index.html>

DVOŘÁK, A. *Simulace pohybu pístků progresivního rozdělovače maziva mazacích systémů*. [Výzkumná zpráva]. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2003. 47 s.

Dynast [program]. Ver. 3.7.36 beta. Praha, 2006. Dostupné z URL < http://virtual.cvut.cz/ seminar05 /dynast-cz.html>

DYNLAB. *Dynlab* [online]. 2006. [citováno 11. 9. 2006]. Dostupné z URL <http://virtual. cvut.cz/dynlabcourse>

FIALA, P. *Stanovení charakteristik vybraných hydraulických prvků mazacích obvodů a jejich simulace*. Brno, 2006. 68 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně na Odboru fluidního inženýrství V. Kaplana. Vedoucí diplomové práce Josef Nevrlý.

FLOREA, F. Methods for greases consistency index calculation. In *Proceedings of the VIIth international symposium „Intertribo ´99, Tribological problems in exposed friction systems*“. 27.4.-30.4.1999. Stará Lesná

FOGEL, D. B. *Evolutionary Computation, - Toward a New Philosopthy of Machine Inteligence*, IEEE Press, Piscateway, 1995.

FUCHS. *Fuchs oil corporation (CZ), spol. s r. o.* [online]. [citováno 6. 8. 2006]. Dostupné z URL < http://www.fuchs-oil.cz/automotive.html>

GIESEKUS, H. *Phänomenologische Rheologie, Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994. 659 s. ISBN 3-540-57513-8.

HEROUT, P. *Učebnice jazyka Java*. České Budějovice: Kopp, 2000. 349 s. ISBN 80-7232-115-3.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Aftificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

JANALÍK, J. *Potrubní hydraulická a pneumatická doprava*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. 206 s. ISBN 80-7078-595-0.

KEOGH, J. *Java bez předchozích znalostí, průvodce pro samouky*. Brno: CP Books, 2005. 275 s. ISBN 80-251-0839-2.

LINCOLN. *Lincoln Industrial Automatic lubrication systems, lubricating equipment, grease guns, and pumps*. [online]. [citováno 4. 8. 2006]. Dostupné z URL <http://www.lincolnindustrial.com/asp/pro ducts/quicklub.asp>

LUBE. *Sp series progressive valve*. [online]. [citováno 4. 8. 2006]. Dostupné z URL <http://www.lube.co.jp/usa/pro ducts/grease_02/016.html>

MAŘÍK, V. - ŠTĚPÁNKOVÁ, O. - LAŽANSKÝ, J. a kol. *Umělá inteligence (3)*. Praha: Academia, 2001. 328 s. ISBN 80-200-0472-6.

MATOUŠEK, R. - OŠMERA, P. - ROUPEC, J. *GA- FIS for Dynamic Environment*, Proceedings of the European Symposium on Computational Intelligence, Physica –

Verlag, A Springer-Verlag Company, pp. 191-196, August 30-September 1, Košice, 2000.

NEPRAŽ, F. - NEVRLÝ, J. - PEŇÁZ, V. – TŘETINA, K. *Modelování systémů s hydraulickými mechanismy*. Brno: BOSCH-Rexroth, 2002. 173 s. ISBN 80-214-2187-8.

NEVRLÝ, J. - PAVLOK, B. *Metodika návrhu větvených mazacích obvodů s podporou moderních výpočetních systémů*. [Výzkumná zpráva]. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2000. 267 s.

NEVRLÝ, J. Measurement of the Basic Rheological Quantities of Biodegradable Greases for the Purpose of Modelling Their Flow. In *Leaf Coppin*, April 2005. (22) 33 ISSN 0265-6582.

NĚMEC, M. *Tok ekologického plastického maziva progresivním rozdělovačem*. Brno, 2004. 114 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně na Odboru fluidního inženýrství V. Kaplana. Vedoucí diplomové práce Josef Nevrlý.

NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: MONTANEX, 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

NOSKIEVIČ, J. *Dynamika tekutinových mechanismů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 1995. 166 s. ISBN 80-7078-297-8.

NOVÁKOVÁ, M. *Analýza toku plastického maziva větveným centrálním mazacím systémem*. Brno, 1999. 72 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně na Odboru hydraulických strojů V. Kaplana. Vedoucí diplomové práce Josef Nevrlý.

OŠMERA, P. *The Initial Population of Genetic Algorithms for Traveling Salesman Problem*. Sborník mezinárodní konference MENDEL´97, Brno. Česká Republika (1997) 105-68.

OŠMERA, P. *Hybrid and distributed genetic algorithms for Traveling Salesman Problem in LAN*, International conference MENDEL´95, 26-28 September 1995, pp. 105-108, Brno 1995.

OŠMERA, P. - ŠIMONÍK, I. - ROUPEC, J. *Multilevel distributed genetic algorithms*. Sborník mezinárodní konference The International Conference IEE/IEEE on Genetic Algorithms. Sheffield (1995) 505-510.

OŠMERA, P. *Genetické algoritmy a jejich aplikace*. [Habilitační práce]. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2001. 108 s.

PARAMO. *Paramo*. [online]. [citováno 13. 8. 2006]. Dostupné z URL <http://www.paramo.cz/htmlindex.php?s1=3&s2=2&PHPSESSID=6513b370ff186198e9b4990a230d0ecb&lng=2&PHPSESSID=5c9c820a3d3be88389d7bb47b492087d>

PELIKÁN, M. *Perserving the linkage by BOA*, Sborník mezinárodní konference MENDEL ´99, Brno, Česká republika, (1999) 106-111.

ROUPEC, J. *Vývoj genetického algoritmu pro optimalizaci parametrů fuzzy regulátorů*. [Disertační práce]. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2001.

RYŠAVÝ, I. *Zpráva k patentové rešerši č. 49/VUT 01*. Patentová kancelář D. Musil, Brno 2003.

SAVIĆ, V. – KNEŽEVIĆ, D. Specific characteristics of design and calculations of system for centralized lubrication. In Proceedings of *VIIthInternational Symposium INTERTRIBO ´99*. 27.-30.4.1999. Stará Lesná

SPURK, J. - AKSEL, N. *Strömungslehre, Einführung in die Theorie der Strömungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. rozšířené vydání, XIV, 2006. 573 s. ISBN 3-540-26293-8.

ŠPAČEK, J. - PAVLOK, B. The Contribution to the Problems of Steady State Flow of Ecological Vascoplastic Grease MOGUL EKO L1. In *Sborník vědeckých prací VŠB – TU Ostrava, řada* strojní, 2003, č.1, část 2. s.67-72. ISBN 80-248-0240-6

ŠPAČEK, J. - PAVLOK. B. Identifikace parametrů reologických modelů plastických maziv. In Sborník konference Workshop 2003, s.160-163. ISBN 80-248-0233-3

ŠPONDR. *Špondr CMS*. [online]. [citováno 10. 9. 2006]. Dostupné z URL <http://www. spondrcms.cz /contcms.htm>

ŠTERN, P. *Reometrická data a reogramy maziv Aralub BAB RC1, Mogul EKO-L1, Plantogel 000S, Plantogel 2S*. ÚHD ČAV PRAHA, 2003.

TRIBOTEC. *TriboTec – Centrální mazání.* [online]. [citováno 17. 8. 2006]. Dostupné z URL <http://www.tribotec.cz/ tribotec/>

VOGEL. *Produkte*. [online]. [citováno 4. 8. 2006]. Dostupné z URL <http://www.skf. com/portal/skf_vog/home/product s?contentId=261085&lang=de>

WEIN, O. - SOBOLÍK, V. - FRIEDRICH, CH. *Periodické toky nenewtonských kapalin*. Praha: Academia, 1989. 152 s. ISBN 80-200-0152-2

ZBOROVSKÁ, B. *Tlakové ztráty při toku ekologických plastických maziv vybranými prvky centrálních mazacích systémů*. Brno, 2003. 81 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně na Odboru hydraulických strojů V. Kaplana. Vedoucí diplomové práce Josef Nevrlý.

ZELINKA, I. *Umělá inteligence v problémech globální optimalizace*. Praha: Ben, 2002. 192 s. ISBN 80-7300-069-5

ZYMÁK, V. *Dynamika pulsujícího průtoku*. Brno: PC-DIR, 1994. 210 s. ISBN 80-85895-00-5

Publikace a spoluautorství

VEPŘEK, J. - NEVRLÝ, J.: Simulace toku plastických maziv. In *Sborník „19. mezinárodní konference Hydraulika a pneumatika ´2006*“. 30.-31.5.2006. Praha

VEPŘEK, J.: Určení mazacích dávek u progresivních rozdělovačů. In *Acta hydraulica et pneumatica*. Žilina, Slovenská spoločnosť pre hydrauliku a pneumatiku, číslo 2, 2005. s. 75-83. ISSN 1336-7536

VEPŘEK, J. Určení mazacích dávek u progresivních rozdělovačů. The 9th international conference "Mechanical Engineering ´2005", Slovak Association of Mechanical Engineers, Bratislava, Slovakia, 2005

VEPŘEK, J. *Tok ekologického plastického maziva Plantogel 2S v přímých ocelových trubicích*. [Výzkumná zpráva]. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2005. 27 s.

VEPŘEK, J. *Simulace toku plastického maziva ve vedeních mazacích obvodů*. [Výzkumná zpráva]. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2005. 18 s.

NEVRLÝ, J., NĚMEC, M., DVOŘÁK, A., VEPŘEK, J. Improved Mathematical Model Results of Grease Distributor. International Scientific-Technical Conference "Hydraulic and Pneumatics ´2005". Polish Society Mechanical Engineers and Technicians. Wroclaw, Poland, 2005

NEVRLÝ, J., NĚMEC, M., DVOŘÁK, A., VEPŘEK, J. Simulace rychlosti toku ekologického plastického maziva Plantogel 2S trubicí. XXVI. Mezinárnodní podzimní kolokvium "Pokroky tvorby a využití simulačních modelů, ASIS 2004", Fakulta informačních technologií VUT v Brně, Katedra informatiky FEI VŠB-TU Ostrava, SCS, EUROSIM, CSSS, MARQ. Svatý Hostýn – Bystřice pod Hostýnem, Česká republika, 2004

NEVRLÝ, J., NĚMEC, M., DVOŘÁK, A., VEPŘEK, J. Zpřesnění matematického modelu rozdělovače plastického maziva – třecí síly. International Scientific Conference "Hydraulics a Pneumatics 2004", Slovak Society for Hydraulics and Pneumatics. Svit, Slovakia, 2004

NEVRLÝ, J., NĚMEC, M., DVOŘÁK, A., VEPŘEK, J. Zpřesnění matematického modelu rozdělovače plastického maziva – místní ztráty. V: Hydraulika a pneumatika. Žilina, Hydropneutech, 2004. ročník VI, číslo 3-4, s. 64-66. ISSN 1335-5171

NEVRLÝ, J. ZBOROVSKÁ, B., VEPŘEK, J. Dynamika toku ekologického plastického maziv. V: Hydraulika a pneumatika. Žilina, Hydropneutech, 2004. ročník VI, číslo 3-4, s. 29-32. ISSN 1335-5171

Připravovaná publikace

VEPŘEK, J. Optimisation of Flow Rates in Lubrication Systems with Progressive Distributors by Genetic Algorithms. In *Proceedings of the Fifth international conference on soft computing applied in computer and economic environment*. Kunovice, 2006.