VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
ODBOR METODIKA KONSTRUOVÁNÍ

Ing. Jiří Vepřek

OPTIMALIZACE PRŮTOKOVÝCH POMĚRŮ V MAZACÍCH OBVODECH S PROGRESIVNÍMI ROZDĚLOVAČI POMOCÍ GENETICKÝCH ALGORITMŮ

Optimisation of Flow Rates in Lubrication Systems with Progressive Distributors by means of Genetic Algorithms

Teze disertační práce
Ph.D. Thesis

Obor:	Konstrukční a procesní inženýrství
Školitelé:	Prof. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.
	Prof. Ing. Pavel Ošmera, CSc.
Oponenti:	

Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA

Progresivní mazací systémy, konstrukce rozdělovačů, ekologická plastická maziva, optimalizace, genetické algoritmy.

KEYWORDS

Progressive lubrication systems, design of progressive distributors, ecological grease, optimisation, genetic algorithms.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Knihovna FSI VUT v Brně.

© Jiří Vepřek, 2010
ISBN 80-214-
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD 5
2 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 5
2.1 Progresivní mazací systémy 5
2.2 Reologie plastických maziv 6
2.3 Neustálený laminární tok viskózních kapalin 7
2.4 Genetické algoritmy 8
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 8
4 DYNAMIKA TOKU PLASTICKÝCH MAZIV 8
4.1 Tok plastických maziv – časový prostor 8
4.1.1 Pohybová rovnice visko-plastické binghamské kapaliny 9
4.1.2 Numerické řešení toku visko-plastické kapaliny 11
4.1.3 Numerické řešení toku visko-elasticko-plastické kapaliny 12
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ 14
5.1 Popis měřicího zařízení a experimentu 14
5.2 Výsledky měření 15
6 SIMULACE 16
6.1 Rychlost zvuku v plastickém mazivu plantogel 2s 16
6.1.1 Postup určení rychlosti zvuku 16
6.1.2 Výsledky 16
6.2 Neustálený tok visko-plastické kapaliny 17
6.2.1 Postup numerické simulace 17
6.2.2 Výsledky 17
6.3 Neustálený tok visko-elasticko-plastické kapaliny 18
6.3.1 Postup numerické simulace 18
6.3.2 Výsledky 19
7 NÁVRH PROGRESIVNÍCH SYSTÉMŮ POMOCÍ GENETICKÝCH ALGORITMŮ 20
7.1 Návrh konstrukce progresivních rozdělovačů 20
7.1.1 Algoritmus programu 20
7.1.2 Způsob zakódování progresivních rozdělovačů 21
7.1.3 Výpočet mazacích dávek u rozdělovačů ZP-A až ZP-D 22
7.1.4 Hodnotící funkce (fitness) a selekce 22
7.1.5 Optimalizace progresivního rozdělovače ZP-A 22
7.2 Optimalizace větvených progresivních systémů 23
7.2.1 Úvod 23
7.2.2 Typ použitého PGA v optimalizačním programu 23

7.2.3 Vývojový diagram optimalizačního programu *24*
7.2.4 Způsob zakódování progresivních systémů *25*
7.2.5 Hodnotící funkce (fitness) a selekce *25*
7.2.6 Migrace *25*
7.2.7 Optimalizace progresivního systému s rozdělovači ZP-A *26*
8 ZÁVĚR 28
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 30
10 PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE 33
11 ŽIVOTOPIS 34
12 ABSTRACT 35

1 ÚVOD

Mazání snižuje rychlost opotřebení kontaktních povrchů a tím výrazně ovlivňuje poruchovost a životnost stroje a zařízení. U strojních zařízení není z důvodu vyššího počtu kontaktních míst snadné, pokud by mělo být mazání prováděno individuálně. K mazání větších strojních zařízení se proto používají centrální mazací systémy (dále jen CMS), které dávkují mazivo čistě, bezpečně a pravidelně [35].

Existuje několik typů univerzálních CMS, které je možné rozdělit na systémy jednopotrubní, dvoupotrubní, vícepotrubní a progresivní, viz kap. 2.1. Dále pak lze rozlišovat systémy speciální [35].

Stále se zvyšující technická úroveň strojů a strojních zařízení a snaha dosáhnout co nejvyšší ekonomičnosti a ekologičnosti jejich provozu jsou hlavními motivy výrobců a uživatelů používat co nejdokonalejší CMS [35]. Požadavky potenciálních uživatelů CMS z tohoto důvodu kladou zvýšené nároky na projektanty těchto systémů, co se týče kvality a samozřejmě také rychlosti návrhu.

Dizertační práce je zaměřena na řešení zásadních problémů spojených s návrhem progresivních CMS, tj. volba prvků a struktury mazacího obvodu, zahrnutí vlivu stlačitelnosti plastického maziva a návrh režimu mazání. Výsledky disertační práce mají zaručit splnění výše jmenovaných požadavků uživatelů CMS a změnit metodiku návrhu těchto mazacích obvodů.

2 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 PROGRESIVNÍ MAZACÍ SYSTÉMY

Progresivní, tj. postupně pracující mazací systémy (dále jen progresivní systémy) jsou CMS s progresivními rozdělovači, které slouží k mazání strojů a strojních zařízení do cca 100 mazacích míst [38]. Tyto systémy lze použít k dopravě oleje nebo plastického maziva a to do tlaků cca 40 MPa. Progresivní systémy jsou provozně velmi spolehlivé, odolné proti mechanickému poškození a vlivům prostředí. Vhodným uspořádáním mazacího obvodu a vhodnou volbou rozdělovačů docílíme požadovanou dodávku maziva do mazacích míst. Princip funkce progresivního systému umožňuje stoprocentní kontrolu a dodávky maziva do všech mazacích míst. Progresivní systémy můžeme členit z různých hledisek.

Progresivní rozdělovače jsou hlavními a většinou stavebnicovými prvky v progresivních systémech [38], které slouží k postupné a poměrné distribuci maziva do dalších rozdělovačů nebo do potrubí. Skládají se z 1 až 10 pracovních sekcí, sekce přívodní (vstupní) a sekce závěrné (koncové). Obvykle se v každé sekci nachází píst. Sekce jsou v rozdělovači vhodně propojeny, aby byl zaručen periodicky se opakující chod, a jsou vyráběný v několika velikostech dle typu progresivního rozdělovače. Velikost sekce určuje objem, který píst vytlačí během jednoho zdvihu. Poměr dělení maziva lze ovlivnit vhodným počtem a velikostí sekcí a také jejich propojením. Zpravidla se využívá jediný princip rozdělovačů. Lze jej nalézt u výrobců mazací techniky [32], [33], [34], [36], [37], [38] apod.

K dopravě maziva v progresivních systémech se používají ručně ovládaná čerpadla, čerpadla poháněná elektromotorem, pneumaticky a mazaným strojem nebo jednotky oběhového mazání [38].

K ostatním prvkům a zařízením progresivních systémů patří prvky pro sledování a řízení činnosti progresivních systémů apod.

Návrh progresivních systémů lze rozdělit do několika fází, které bylo nutné dříve provádět ručně, tj. bez pomoci software. V kap. 7.1 a 7.2 budou představeny softwarové prostředky využívající genetické a paralelní genetické algoritmy, s nimiž lze návrh progresivních systémů zautomatizovat.

2.2 REOLOGIE PLASTICKÝCH MAZIV

Plastická maziva [29], [8] 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. Zušlechťující přísady jsou zastoupeny 0,5-5%. Podle typu a množství zpevňovadla mohou mít maziva různou konzistenci: od velmi měkké až po velmi tuhou. Konzistence plastického maziva je klasifikována podle stupnice zavedené organizací NLGI.

Plastická maziva patří mezi nenewtonské kapaliny [29], [30], protože se neřídí Newtonovým zákonem, podle něhož je smykové napětí při laminárním proudění lineární funkcí gradientu rychlosti [20], ale obecně je tento vztah nelineární. Viskozita plastických maziv závisí především na fyzikálně-chemickém složení [29], na teplotě, tlaku, na čase (tixotropie) apod. Závislosti mezi smykovým napětím a rychlostním gradientem se experimentálně zjišťují a zobrazují, jako tzv. tokové křivky, nebo-li reogramy [2].

Pro popis tokového chování nenewtonských kapalin byla navržena řada reologických modelů, které se dělí na modely časově nezávislých kapalin a na modely časově závislých kapalin [2], [20], [29] apod. Předmětem zájmu jsou modely časově nezávislých kapalin. K matematickému popisu látek vykazující ideální visko-plastické chování, byl navržen Bighamův model [2], [19]. Herschel-Bulkleyův model [19] rozšiřuje Binghamův model tak, že nahradí newtonské chování za toku chováním mocninným.

Jako viskoelastické jsou označovány materiály, které se za určitých okolností chovají jako vazké kapaliny a za jiných jako pružná tělesa [9]. Rozhodující je délka trvání deformačního procesu Δt [s] ve srovnání s materiálovým časem T [s], charakterizující pomíjivou paměť materiálu na jeho výchozí tvar. Obecně lze tyto okolnosti charakterizovat tzv. Debořiným číslem [9]. Teorie viskoelasticity je rozdělena na dvě hlavní oblasti, tj. na lineární a na nelineární [20]. Mezi dva nejčastěji používané lineární viskoelastické modely patří Maxwellův a Jeffreysův model [20]. Nelineární viskoelasticita je oblast reologie věnovanou studiu viskoelastických materiálů, které jsou vystaveny velkým deformacím, např. se jedná

o tok viskoelastických kapalin [20]. Pro studium toku ekologických plastických maziv mají význam dva visko-elasticko-plastické modely, které byly prezentovány v literatuře [24] a [25].

Reologické vlastnosti [29] významně ovlivňují užitné vlastnosti plastických maziv. Mezi jejich nejdůležitější reologické charakteristiky patří mez toku, zdánlivá a plastická viskozita [30]. Reometrická měření plastických maziv Plantogel 2S, Plantogel 000S, Mogul EKO L1 a Aralub BAB RC 1 byla zpracována v rámci grantového projektu GAČR 101/02/0605 a jsou shrnuta ve zprávě [29].

Mez toku byla stanovena v tzv. režimu CR (Controlled Rate), ve kterém je nezávislou veličinou smyková rychlost, tj. měří se materiálová odezva smykového napětí τ [Pa] a také v režimu CS (Controlled Stress), který je dosud nejpřesnějším způsobem [30]. V tomto případě bylo na sledovanou látku v reometru postupně aplikováno smykové napětí a určen okamžik, kdy se rotor reometru začne otáčet, tj. nezávislou proměnnou bylo smykové napětí, závislou proměnnou byla smyková rychlost.

Viskoelastické charakteristiky [30], tj. komplexní elasticita G^*, paměťový modul G' charakterizující elastickou složku deformace, ztrátový modul pružnosti G'' charakterizující viskózní složku deformace a fázový posun δ byly stanoveny v režimu CS pomocí dynamických oscilačních testů, kdy je látka vratně namáhána vynucenými oscilacemi. Dle [30] vyplývá, že ekologická plastická maziva jsou z reologického hlediska tixotropní viskoplastické látky s elastickou složkou.

2.3 NEUSTÁLENÝ LAMINÁRNÍ TOK VISKÓZNÍCH KAPALIN

K řešení dynamických jevů (uvnitř potrubí) v časovém prostoru se dnes nejčastěji používají metody charakteristik, metoda Lax-Vendroff, případně metoda typu Runge-Kutta 4. řádu [12]. Principem všech těchto numerických metod je rozdělení trubic na malé úseky. Následně se pro každý úsek trubice sestaví rovnice kontinuity a rovnice silové rovnováhy, které se příslušnou numerickou metodou řeší.

K řešení toku viskózních kapalin ve frekvenční oblasti lze použít metodu přenosových matic. Tato metoda je založena na Laplaceově transformaci dle času v linearizovaných rovnicích kontinuity, rovnováhy a okrajových podmínkách. Při použití této metodiky řešení dynamiky hydraulického obvodu je možno zadat budící funkci ve tvaru Fourierovy rady a řešit odezvu matematického modelu hydraulické trati na tuto budící funkci [12].

V publikaci [12] je uveden tvar přenosové matice pro výpočtové modelování tlakových a průtokových pulsací ve větvených hydraulických obvodech. Tento tvar přenosové matice je platný pro neustálený tok newtonské stlačitelné kapaliny v trubici s elastickými vlastnostmi a tlumením.

Odvození přenosové matice pro trubici se stlačitelnou visko-plastickou binghamskou kapalinou je značně problematické. Nadějné se zdají být výpočtové vztahy, které byly publikovány ve článku [23] pro stanovení neustáleného toku zobecněné binghamské kapaliny s pamětí v pohyblivé trubici.

2.4 GENETICKÉ ALGORITMY

Genetické algoritmy (Genetic Algorithms), dále jen GA, jsou prohledávací algoritmy založené na mechanismu Darwinova přirozeného výběru a Mendelovy dědičnosti. Kombinují adaptivní a evoluční vývoj organismu s funkční optimalizací [14]. Tento typ evolučních algoritmů patří do skupiny smíšených algoritmů [3], která je tvořena metodami deterministickými a stochastickými. Tvar GA byl popsán Goldbergem [6].

Paralelní genetické algoritmy (Paralel Genetic Algorithms), dále jen PGA, jsou výkonné stochastické prohledávací strategie inspirované přírodou, dovolující řešit větší a složitější problémy, přičemž často vedou rychleji k řešení a současně konvergují i k lepším výsledkům [14], než je tomu u GA. Používají se tři modely PGA: (a) farmářský, tj. fading model, (b) migrační a (c) difusní model.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je řešení problémů spojených s návrhem konstrukce rozdělovačů a progresivních mazacích systémů sloužících k distribuci stlačitelných plastických maziv. Podrobněji lze tyto cíle specifikovat následovně:

- vývoj nových softwarových programů určených k návrhu konstrukce progresivních rozdělovačů a progresivních systémů, s jejichž pomocí lze dosáhnout významného technického, ekologického a ekonomického přínosu oproti ručnímu návrhu,
- teoretické odvození a početní (numerické) řešení toku stlačitelných plastických maziv v časovém prostoru, jako visko-plastických látek,
- experimentálně-početní určení konstant maziva Plantogel 2S s využitím metody přenosových matic aplikované na newtonské kapaliny,
- analýza možností využití metody přenosových matic k řešení toku visko-plastických látek ve frekvenční oblasti,
- početní (numerické) řešení neustáleného toku plastických maziv, jako visko-elasticko-plastických látek.

Tato disertační práce navazuje na předchozí práce, které byly provedeny v návaznosti na grantový projekt, viz [29], tj. jedná se o: disertační práci [16] a diplomové práce [17], [18], [21] a [22].

4 DYNAMIKA TOKU PLASTICKÝCH MAZIV

4.1 TOK PLASTICKÝCH MAZIV – ČASOVÝ PROSTOR

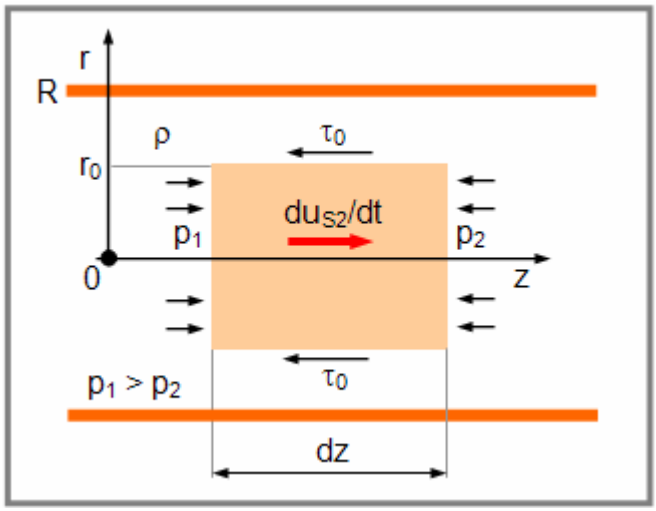
V této kapitole jsou prezentovány rovnice, které byly odvozeny za účelem numerického řešení nestacionárního laminárního toku stlačitelné binghamské visko-plastické kapaliny v dokonalé tuhé trubici kruhového průřezu. Uvažujeme stacionární rychlostní profil kapaliny v trubici. K řešení byla použita metoda Lax-Wendroff [13], [10] a [11]. Odvození lze považovat za původní.

4.1.1 Pohybová rovnice visko-plastické binghamské kapaliny

Pohybová rovnice popisující laminární tok kapaliny uvnitř trubice kruhového průřezu byla odvozena z Cauchyho tvaru pohybových rovnic [1], [2] a její tvar je

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\left(\tau_0 - \eta_B \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] = 0 . \tag{4.1}$$

kde: r, z jsou souřadnice [m] a η_B je binghamská viskozita [Pa·s]. Do rovnice (4.1) je dosazen Binghamův konstitutivní vztah [19]. Rovnice je dvakrát integrována po průřezu za předpokladu konstantní časové změny rychlosti. Integrační konstanty jsou určeny z okrajových podmínek, tj. pro r = R platí, že u = 0 a pro r = r_0 je $\partial u/\partial r$ = 0, viz obr. 4.1. Z pohybové rovnice elementu visko-plastické kapaliny (4.2), ve které nedochází ke smyku jednotlivých vrstev, vyjádříme mez toku τ_0.



Obr. 4.1 Silové poměry na pístovém elementu binghamské visko-plastické kapaliny

$$\tau_0 = -\frac{1}{2} r_0 \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{2}\frac{\partial u_{S2}}{\partial t}\rho r_0 . \tag{4.2}$$

Po integraci rovnice (4.1) a s uvažováním rovnice (4.2) obdržíme výsledný tvar, z něhož vyjádříme rychlost kapaliny v trubici u

$$u = \frac{1}{\eta_B}\left[-\frac{1}{4}\rho \frac{\partial u}{\partial t}\left(R^2 - r^2\right) - \frac{1}{4}\frac{\partial p}{\partial z}\left(R^2 - r^2\right) - \tau_0 (R - r) \right]. \tag{4.3}$$

Nyní pomocí věty o střední hodnotě integrálu [4] stanovíme střední rychlost v okrajové části trubice u_{S1} a ve vnitřní části trubice u_{S2}, kde nedochází ke smyku jednotlivých vrstev kapaliny. Určíme hodnoty dílčích průtoků, tj. v okrajové a vnitřní části trubice a ty poté sečteme, tj.

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{4.4}$$

a úpravou získáme vztah vyjadřující střední rychlost v trubici, tj.

$$u_S = -\frac{\rho}{8\eta_B}\frac{1}{R^2}\left(R^2 - r_0^2\right)^2 \frac{\partial u_{S1}}{\partial t} - \frac{1}{8\eta_B}\frac{1}{R^2}\left(R^2 - r_0^2\right)^2 \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_0}{3\eta_B}\frac{1}{R^2}\left(R^3 - 3Rr_0^2 + 2r_0^3\right) -$$

$$\frac{\rho}{4\eta_B}\frac{r_0^2}{R^2}\frac{\partial u_{S2}}{\partial t}\left(R^2 - r_0^2\right) - \frac{1}{4\eta_B}\frac{r_0^2}{R^2}\frac{\partial p}{\partial z}\left(R^2 - r_0^2\right) - \frac{\tau_0}{\eta_B}\frac{r_0^2}{R^2}\left(R - r_0\right). \tag{4.5}$$

Derivace dílčích středních rychlostí u_{S1} a u_{S2} nahradíme časovými derivacemi střední rychlosti u_S. K tomu byly zavedeny proměnné k_1 a k_2, které mezi těmito derivacemi vyjadřují vzájemný poměr

$$\frac{\partial u_{S1}}{\partial t} = k_1 \frac{\partial u_S}{\partial t} \text{ a } \frac{\partial u_{S2}}{\partial t} = k_2 \frac{\partial u_S}{\partial t}. \tag{4.6)-(4.7}$$

Proměnné k_1 a k_2 stanovíme, jako podíl rychlostí (za předpokladu nenulové střední rychlosti, tj. $u_S > 0$). Jejich tvar je

$$k_1 = \frac{u_{S1}}{u_S} \text{ a } k_2 = \frac{u_{S2}}{u_S}. \tag{4.8)-(4.9}$$

Proměnná k_1 bude pro rychlosti u_S nabývat hodnot menších než 1 a proměnná k_2 bude pro tyto rychlosti u_S větší než 1. Po dosazení vztahů (4.6) a (4.7) do (4.5) obdržíme pohybovou rovnici pro visko-plastickou binghamskou kapalinu, kterou upravíme pomocí zavedených proměnných

$$\beta = R^4 - r_0^4,\ \delta = R^3 - r_0^3 \text{ a } k_c = k_1\left(R^2 - r_0^2\right)^2 + 2r_0^2 k_2\left(R^2 - r_0^2\right). \tag{4.10)-(4.12}$$

Po následné úpravě členů bude mít výsledná pohybová rovnice tvar

$$\frac{\partial u_S}{\partial t} + \frac{1}{\rho k_c}\frac{\partial p}{\partial z}\beta + \left[\frac{8\tau_0}{3\rho k_c u_S}\delta + \frac{8R^2\eta_B}{\rho k_c}\right]u_S = 0. \tag{4.13}$$

Nyní rovnici (4.14) doplníme o rovnici kontinuity stlačitelné kapaliny

$$\frac{\partial p}{\partial t} + K\frac{\partial u_S}{\partial z} = 0, \tag{4.14}$$

kde: K je modul objemové stlačitelnosti visko-plastické kapaliny [kg.m^{-1}.s^{-2}]. Poté přistoupíme k numerickému řešení obou rovnic.

4.1.2 Numerické řešení toku visko-plastické kapaliny

Numerická metoda Lax-Wendroff je výhodná pro řešení pohybových rovnic, využívá rozvoje funkce do Taylorovy řady do 2. stupně [13]. Tlak a průtok se zjišťuje z hodnot předchozího časového kroku, z počátečních a okrajových podmínek. Základního schéma metody má tvar [13]

$$f_{x_j}^{t+\Delta t} = f_{x_j}^{t} - a \cdot \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x} \cdot \left(f_{x_{j+1}}^{t} - f_{x_{j-1}}^{t} \right) + a^2 \cdot \frac{\Delta t^2}{2 \cdot \Delta x^2} \cdot \left(f_{x_{j+1}}^{t} - 2 \cdot f_{x_j}^{t} + f_{x_{j-1}}^{t} \right), \tag{4.15}$$

kde a je rychlost zvuku v kapalině [m.s^{-1}] a Δx je délkový úsek trubice [m]. Aplikací výsledného schématu (4.16), rovnic (4.13) a (4.14) obdržíme numerické vztahy pro výpočet tlaku a průtoku. Pro vnitřní bod trubice obdržíme vztah pro průtok

$$Q_{x_j}^{t+\Delta t} = Q_{x_j}^{t} - \frac{\Delta t}{8\Delta x} \frac{\beta}{k_c \alpha} \pi D^2 p_{x_{j+1}}^{t} + \frac{\Delta t}{8\Delta x} \frac{\beta}{\rho k_c} \pi D^2 p_{x_{j-1}}^{t} - \Delta t \frac{8}{k_c \rho} \left(\frac{\delta \tau_0 \pi D^2}{12 Q_{x_j}^{t}} + \eta_B R^2 \right) Q_{x_j}^{t} +$$

$$\frac{\Delta t^2}{2\Delta x^2} \frac{k\beta}{\rho k_c} Q_{x_{j+1}}^{t} - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \frac{k\beta}{\rho k_c} Q_{x_j}^{t} + \frac{\Delta t^2}{2\Delta x^2} \frac{k\beta}{\rho k_c} Q_{x_{j-1}}^{t} + \frac{\Delta t^2}{2\Delta x} \frac{\beta}{k_c^2 \rho^2} \left(\frac{\delta \tau_0 \pi D^2}{12 Q_{x_{j+1}}^{t}} + \eta_B R^2 \right) \pi D^2 p_{x_{j+1}}^{t} -$$

$$\frac{\Delta t^2}{2\Delta x} \frac{\beta}{k_c^2 \rho^2} \left(\frac{\delta \tau_0 \pi D^2}{12 Q_{x_{j-1}}^{t}} + \eta_B R^2 \right) \pi D^2 p_{x_{j-1}}^{t} + \frac{32 \Delta t^2}{\rho^2 k_c^2} \left[\left(\frac{\delta \tau_0 \pi D^2}{12 Q_{x_j}^{t}} + \eta_B R^2 \right) \right]^2 Q_{x_j}^{t} \tag{4.16}$$

a vztah pro tlak

$$p_{x_j}^{t+\Delta t} = p_{x_j}^{t} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} k \frac{4 Q_{x_{j+1}}^{t}}{\pi D^2} + \frac{\Delta t}{2\Delta x} k \frac{4 Q_{x_{j-1}}^{t}}{\pi D^2} + \frac{\Delta t^2}{2\Delta x^2} \frac{k\beta}{\rho k_c} p_{x_{j+1}}^{t} - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \frac{k\beta}{\rho k_c} p_{x_j}^{t} + \frac{\Delta t^2}{2\Delta x^2} \frac{k\beta}{\rho k_2} p_{x_{j-1}}^{t} +$$

$$\frac{8\Delta t^2}{\Delta x} \frac{k}{k_c \rho} \left(\frac{\tau_0 \delta \pi D^2}{12 Q_{x_{j+1}}^{t}} + \eta_B R^2 \right) \frac{Q_{x_{j+1}}^{t}}{\pi D^2} - \frac{8\Delta t^2}{\Delta x} \frac{k}{k_c \rho} \left(\frac{\tau_0 \delta \pi D^2}{12 Q_{x_{j-1}}^{t}} + \eta_B R^2 \right) \frac{Q_{x_{j-1}}^{t}}{\pi D^2}. \tag{4.17}$$

Výpočtové vztahy pro počáteční a koncový bod v trubici lze stanovit, jestliže zanedbáme jednu z rovnic. V případě, že bude zanedbána rovnice silové rovnováhy, získáme pro počáteční bod vztahy

$$Q_{x_j}^{t+\Delta t} = \frac{\pi D^2 \Delta x}{4k\Delta t} \left(p_{x_j}^{t+\Delta t} - p_{x_j}^{t} \right) + Q_{x_{j+1}}^{t+\Delta t}, \tag{4.18}$$

$$p_{x_j}^{t+\Delta t} = -\frac{4k\Delta t}{\pi D^2 \Delta x} \left(Q_{x_{j+1}}^{t+\Delta t} - Q_{x_j}^{t+\Delta t} \right) + p_{x_j}^{t}. \tag{4.19}$$

Pro koncový bod trubice budou mít vztahy (pro průtok a tlak) podobný tvar, viz dizertační práce. Numerické řešení tlaku a průtoku v časovém kroku $t+\Delta t$ lze provést pro hodnoty r_0, u_{S1}, u_{S2}, k_1 a k_2 určené v předchozím časovém kroku t, pokud jej volíme dostatečně jemný nebo snad pomocí implicitního schématu. Numerické řešení veličin Q a p je vhodné odstartovat z nenulových hodnot tlaku a průtoku vypočítaných analyticky ze vztahů pro stacionární tok binghamské visko-plastické kapaliny, viz [15] str. 15, vztah (24).

U metody Lax-Wendroff je volba velikosti časového kroku Δt nezávislá na vzdálenosti mezi uzlovými body Δx [13] a je tedy v podstatě libovolná. Podmínka velikosti časového kroku má tvar [13]

$$\Delta x \geq a\Delta t_{L-W} \Rightarrow \Delta t_{L-W} \leq \frac{\Delta x}{a}, \tag{4.20}$$

kde: Δx je délkový úsek trubice [m], a je rychlost zvuku v kapalině [m.s^{-1}] a $\Delta t_{L\text{-}W}$ je hledaný časový krok [s]. Numerický výpočet rovnic (4.16) až (4.19) vykazuje dobrou stabilitu. Velikost časového kroku je zapotřebí volit s ohledem na hodnoty střední rychlosti.

4.1.3 Numerické řešení toku visko-elasticko-plastické kapaliny

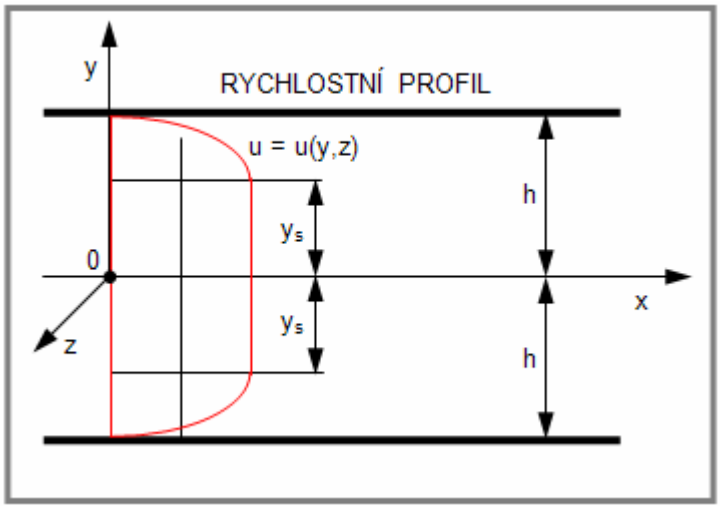
V této podkapitole je prezentována pohybová rovnice popisující neustálený oscilační tok nestlačitelné visko-elasticko-plastické kapaliny mezi dvěma rovnoběžnými deskami. Odvození této rovnice bylo publikováno v [25]. Výsledné vztahy jsou použity k numerickému řešení toku plastického maziva, které je programově zpracováno v prostředí MATLAB, viz kap. 6.3. Výchozí pohybová rovnice má dle [25] následující tvar

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\lambda_1\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=p_x+\lambda_1\frac{dp_x}{dt}+\eta\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\tau_0\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\Big/\sqrt{\varepsilon+\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2}\right]. \tag{4.21}$$

Vyšetříme tok plastického maziva mezi dvěma konečnými deskami umístěnými ve vzdálenostech $y = \pm h$ od počátku souřadného systému, viz obr. 4.2. Tok maziva je poháněn oscilačním tlakovým gradientem [25].

Po zavedení bezrozměrných kritérií bude mít pohybová rovnice (4.21) tvar [25]

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\Lambda_1\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=1+a\cos t-\Lambda_1 a\sin t+\Lambda_0\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\Lambda_3\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\Big/\sqrt{\varepsilon+\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2}\right]. \tag{4.22}$$



Obr. 4.2 Neustálený tok visko-elasticko-plastické kapaliny mezi dvěma rovnoběžnými deskami

Z důvodu zjednodušení zápisu zavedeme proměnné [25]

$$\Lambda_0 = \frac{\eta}{\rho\omega h^2},\ \Lambda_1 = \lambda_1\omega,\ \Lambda_3 = \frac{\tau_0}{hp_{x0}} \text{ a } a = \frac{p_{x1}}{p_{x0}}. \qquad (4.23)\text{-}(4.26)$$

K numerickému řešení pohybové rovnice (4.22) použijeme metodu konečných diferencí [10]. Zavedeme síť (y,t) a pomocí ní provedeme náhradu derivací v rovnici (4.22) prostřednictvím diferenčních vztahů [10]. Sled bodů v síti, ve směru polohy, označíme indexem i a v čase budeme označovat indexem j. Tvar rovnice je

$$\frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta t} + \Lambda_1 \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta t^2} = 1 + a\cos t_{j+1} - \Lambda_1 a \sin t_{j+1} +$$

$$\Lambda_0 \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{\Delta y^2} + \Lambda_3 \frac{1}{\Delta y}\left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\sqrt{\varepsilon \cdot \Delta y^2 + \left(u_{i+1,j} - u_{i+1,j}\right)^2}} - \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\sqrt{\varepsilon \cdot \Delta y^2 + \left(u_{i,j} - u_{i-1,j}\right)^2}} \right). \qquad (4.27)$$

Prostřednictvím metody konečných diferencí bude diferenciální rovnice (4.27) numericky vyšetřována společně s podmínkou neulpívání, tj.

$$u = 0 \text{ pro } y = \pm 1. \qquad (4.28)$$

Jak bylo v [25] řečeno, stabilní řešení řízené konstantním tlakovým gradientem, který je počáteční hodnotou periodického tlakového gradientu, je dobrou volbou pro počáteční podmínky. Řídící rovnice (4.22) bude mít poté tvar [25]

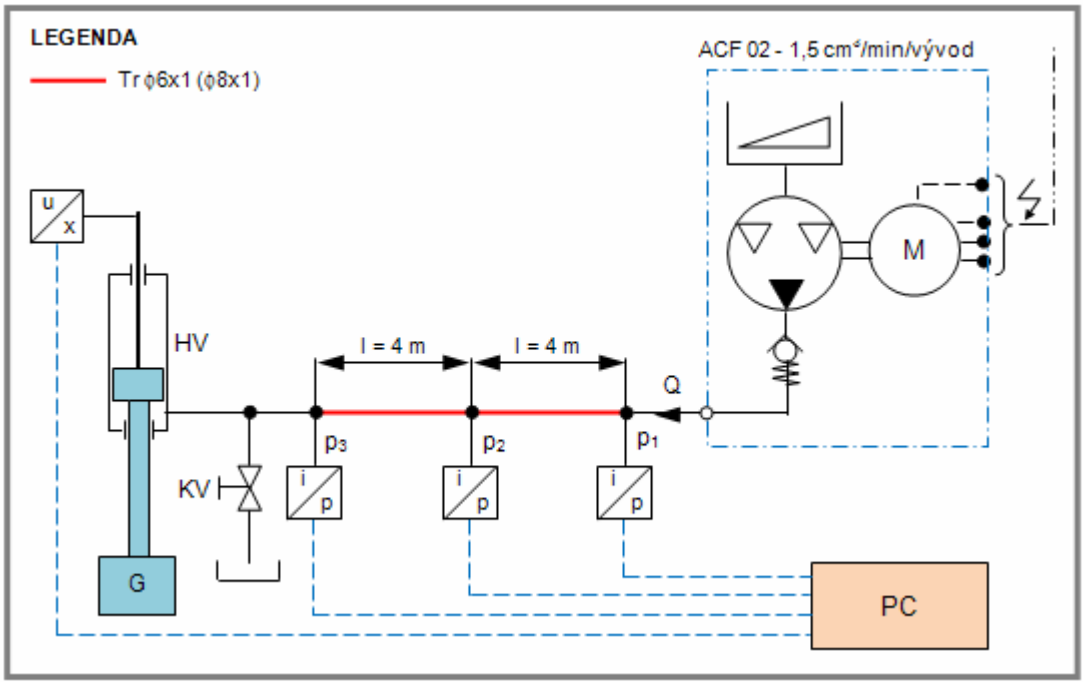
$$\Lambda_0 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 1 + a = 0. \qquad (4.29)$$

Řešením řídící rovnice (4.29) jsou vztahy určující rychlost v okrajových částech a ve vnitřní části mezi rovnoběžnými deskami. Určení hraničních poloh všech oblastí je provedeno z podmínky silové rovnováhy mezi konstantním tlakovým spádem a mezí toku [25].

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

5.1 POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ A EXPERIMENTU

Za účelem stanovení tlakových ztrát v potrubí mazacího obvodu a zejména určení rychlosti zvuku v ekologickém plastickém mazivu Plantogel 2S byly provedeny experimenty pomocí měřicí trati, která je zobrazena na obr. 5.1. Zdrojem tlakového maziva je mazací přístroj ACF 02 (Tribotec) [34]. V měřicí trati jsou dále zapojeny dvě trubky o průměrech Tr ϕ6x1 nebo Tr ϕ8x1 a délkách l = 2 x 4 m, na kterých jsou měřeny tlaky p_1, p_2 a p_3 pomocí snímačů tlaku DMP 333, s rozsahem 0-16 MPa (BD Senzors), viz obr. 5.1.



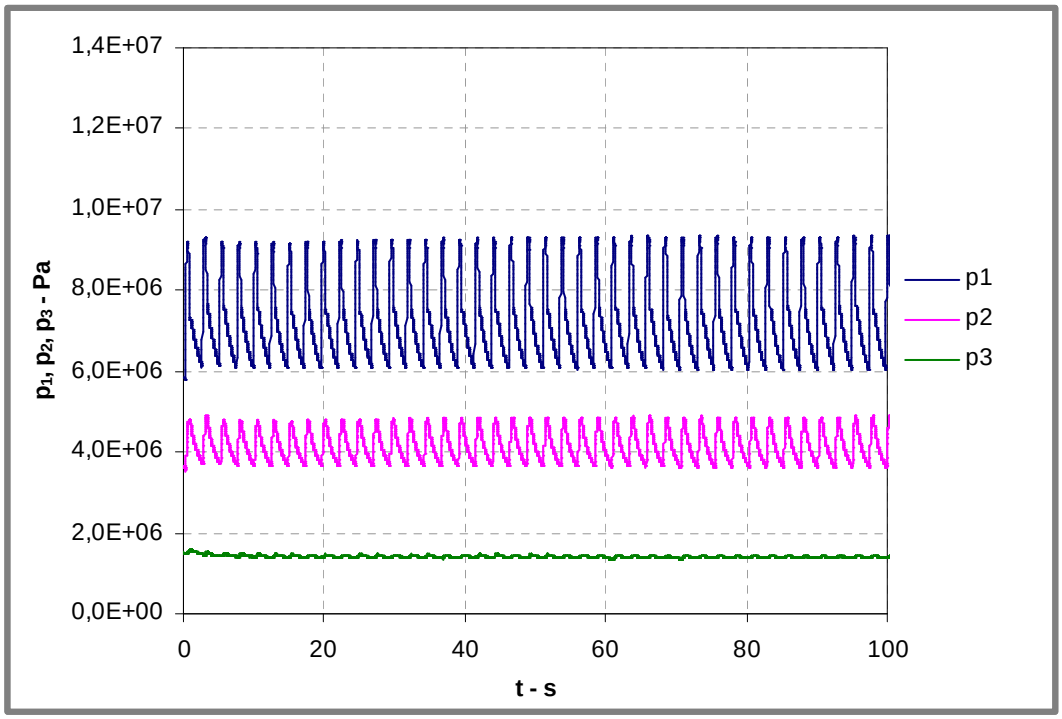
Obr. 5.1 Schéma experimentálního zařízení (HV – hydraulický válec se snímačem polohy, *G* – zátěž na pístnici, p_1-p_3 – snímače tlaku, ACF 02 – mazací přístroj (Tribotec), KV – kulový ventil, Tr 6x1 a Tr 8x1 jsou pozinkované experimentální trubky

Třída přesnosti tlakových snímačů DMP 333 je ±0,5 (0,25) % a výstupní proudový signál je v rozsahu 4-20 mA. Dále je v trati zařazena odbočka s kulovým ventilem KV pro upouštění plastického maziva, dosáhne-li píst měřicího přípravku během provozu mazacího přístroje horní úvrati. Po dosažení této úvratě je vypnut mazací přístroj a pomocí kulového ventilu KV je upuštěno mazivo. Poté je opět uzavřen kulový ventil KV. Měřicí přípravek se závěsem slouží k dosažení konstantního protitlaku na výstupu z trubic. Průřez pístu ze strany pístnice je $S = 8{,}48.10^{-5}$ m^2. K pístnici měřicího přípravku je připojen snímač polohy, tj. potenciometr T50

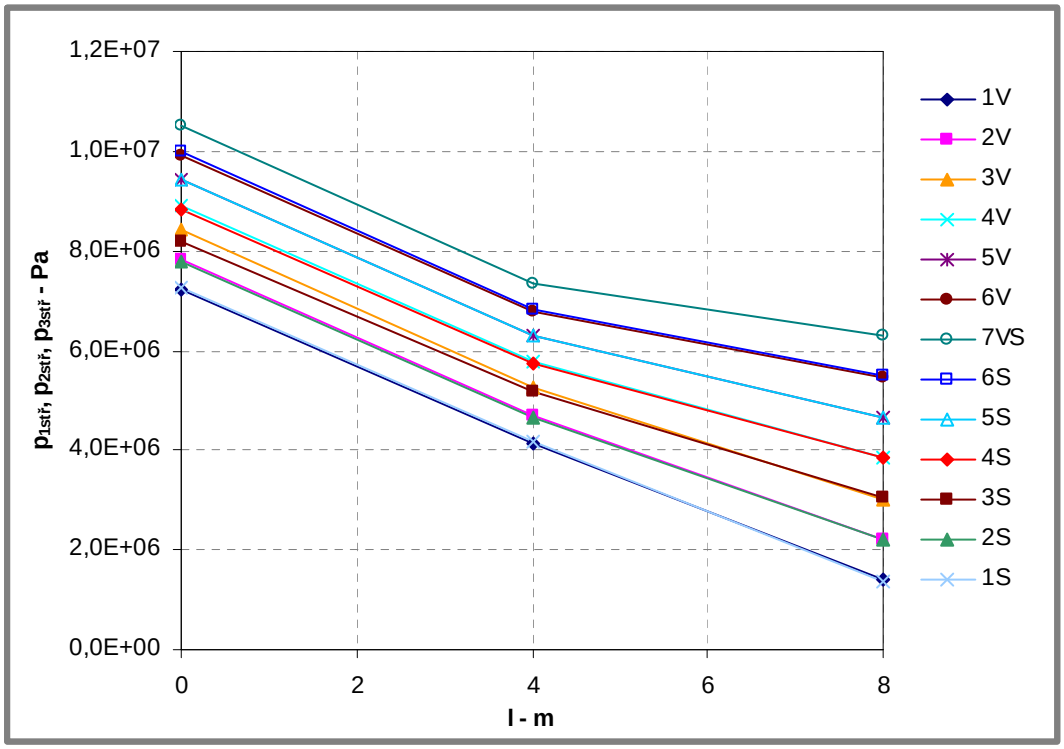
(Novotechnik) s rozsahem 0-50 mm a linearitou ±0,15%. Počítač je vybaven měřicí kartou a software ScopeWin (Jurák). Na závěs měřicího přípravku bylo položeno závaží určité hmotnosti. Poté byl spuštěn časový záznam veličin, tj. tlaků p_1, p_2, p_3 a polohy x, se vzorkovací frekvencí 0,01 s a následně spuštěn mazací přístroj. Jakmile se píst měřicího přípravku přesunul do horní úvratě, byl vypnut měřicí přístroj a ukončen záznam měřených veličin. Takovým způsobem byl získán první záznam měření, jehož soubor má označení RV 111 V. Další měření byla realizována vždy se zátěží navíc, tj. RV 112 V až RV 117 VS a poté 6 měření s klesající zátěží, tj. RV 116 S až RV 111 S.

5.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Na obr. 5.2 jsou zobrazeny výsledky prvního experimentálního měření, tj. se zátěží 4 kg na měřicím přípravku. V obvodu byly zařazeny trubice o průměrech ϕ6x-1 mm a délkách l = 2 x 4000 mm. Z výsledků měření, viz obr. 5.2, je patrný útlum amplitudy tlaku ve vzdálenosti 4 a 8 m od mazacího přístroje. Podobně vypadají ostatní naměřené průběhy. Tyto časové záznamy tlaků, tj. p_1, p_2 a p_3, byly dále využity k určení rychlosti zvuku v plastickém mazivu Plantogel 2S, viz kap. 6.1. Z obr. 5.3 jsou patrné hodnoty tlakových ztrát pro průtok Q = 5,27.10^{-8} m^3.s^{-1} ve dvou sériově řazených trubicích Tr ϕ6x1. Z výsledků vyplývá, že s narůstající zátěží na přípravku se lineární závislost středních hodnot tlaků po délce trubice mění v nelineární. Stejný charakter průběhů tlaků byl naměřen i při klesajících hodnotách zátěže. Tím může být vyloučen vliv tixotropie plastického maziva.



Obr. 5.2 Tlaky p_1, p_2, p_3 měřené na vstupu, uprostřed a na konci trubic; tok ekologického plastického maziva Plantogel 2S, ocelové trubice ϕ6x1-4000 mm, teplota t = 25,2°C, soubor RV 111 V



Obr. 5.3 Střední hodnoty ustálených periodických průběhů tlaků p_1, p_2 a p_3 na vstupu, uprostřed a na konci trubic Tr ϕ6x1 pro zátěž 1-7 a 7-1 na měřicím přípravku, vzestup a pokles zátěže, soubory RV 111 V až RV 117 VS a RV 117VS až RV 111 S

6 SIMULACE

6.1 RYCHLOST ZVUKU V PLASTICKÉM MAZIVU PLANTOGEL 2S

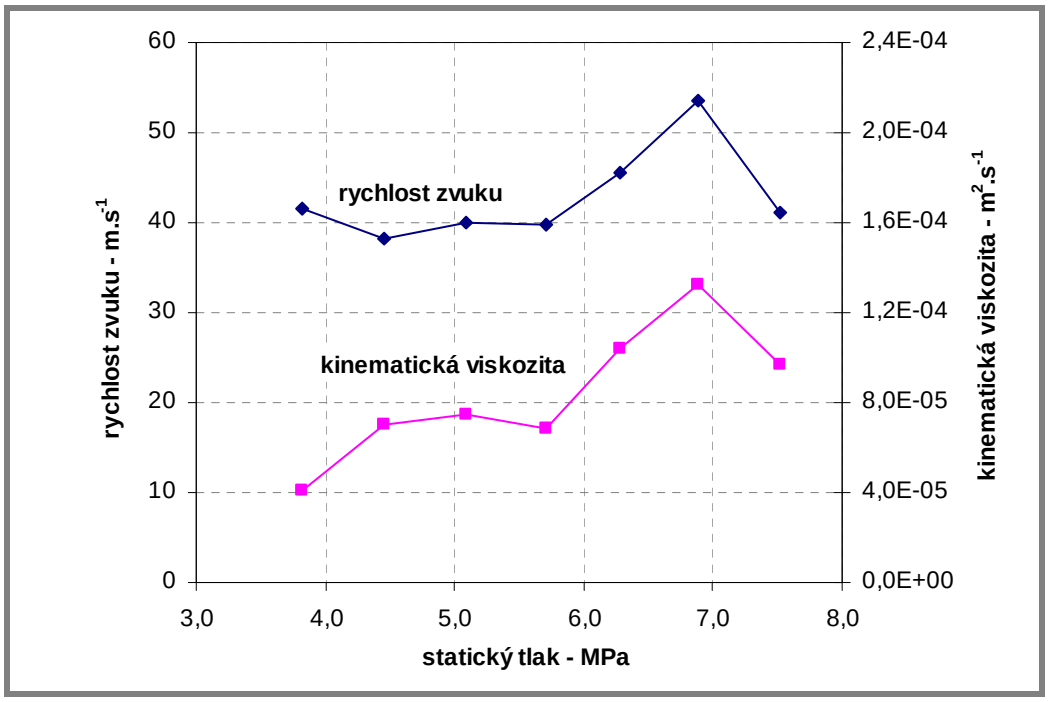
6.1.1 Postup určení rychlosti zvuku

K početnímu určení rychlosti zvuku v plastickém mazivu Plantogel 2S byly použity výsledky experimentálních měření tlaků p_1, p_2 a p_3 na vstupu do trubic, mezi nimi a na jejich výstupu, viz kap. 5.2. Pomocí programu Parametr [12] byla provedena Fourierova transformace naměřených dat, a tím bylo určeno amplitudové a fázové spektrum a další údaje. Tato data byla poté načtena do programu F-A char, který využívá k určení rychlosti zvuku metodu přenosových matic [12]. Konstanty přenosové matice jsou určeny pomocí GA.

6.1.2 Výsledky

Na obr. 6.1 jsou zobrazeny výsledky stanovené v programu F-A char. Jedná se o rychlost zvuku a kinematickou viskozitu v plastickém mazivu Plantogel 2S v závislosti na hodnotě statického tlaku [31]. Statický tlak představuje střední hodnotu tlaků p_1, p_2 a p_3.

Jak je patrné, rychlost zvuku v plastickém mazivu má poměrně nízkou hodnotu, což je dáno velkým tlumením kapaliny, a její možná závislost na střední hodnotě statického tlaku v trubici je spekulativní. Vypočítaná hodnota rychlosti zvuku byla využita k simulaci toku plastického maziva Plantogel 2S, viz kap. 6.2.



Obr. 6.1 Rychlost zvuku v plastickém mazivu Plantogel 2S a kinematická viskozita v závislosti na středních hodnotách tlaků na vstupu do trubic, mezi nimi a na jejich konci, trubice 2 x Tr 6x1-4000 mm [31]

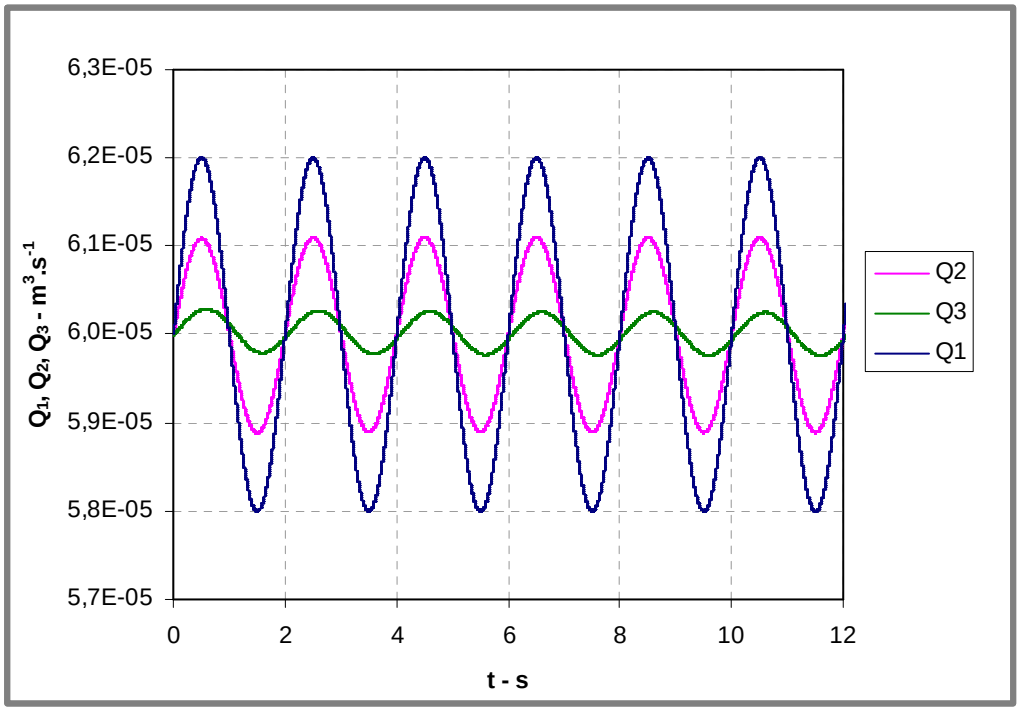
6.2 NEUSTÁLENÝ TOK VISKO-PLASTICKÉ KAPALINY

6.2.1 Postup numerické simulace

Numerické řešení neustáleného toku stlačitelné visko-plastické binghamské kapaliny bylo provedeno ve vývojovém prostředí Matlab. Základem výpočtů jsou vztahy uvedené v kap. 4.1.1 a 4.1.2. K numerickému řešení byla použita metoda Lax-Wendroff. Před samotným spuštěním výpočtu jsou v programu zadány vstupní parametry trubice. Dále pak jsou definovány vlastnosti plastického maziva, okrajové podmínky a velikost časového kroku. Po spuštění výpočtu jsou vypočítány hodnoty stacionárních tlaků p a průtoku Q. Tlakový spád je pro ustálený průtok vypočítán z implicitní rovnice, která byla odvozena z Buckingham-Reinerovy rovnice [2], [15]. Z okrajové podmínky na výstupu z trubice jsou poté dopočítány hodnoty tlaků v zadaných místech trubice. V dalších krocích jsou hodnoty tlaků p a průtoků Q počítány z rovnic, které byly uvedeny v kap. 4.1.2. Hodnoty $Q^{t+\Delta t}$ a $p^{t+\Delta t}$ jsou v novém časovém kroku vypočítány z hodnot předchozího kroku. Uvedené výpočty byly provedeny s okrajovou podmínkou průtoku na vstupu a okrajovou podmínkou tlaku na výstupu z trubice. Kromě těchto hodnot je zapotřebí v novém časovém kroku vypočítat hodnoty veličin: r_0, u_{S1}, u_{S2}, k_1 a k_2 a dále pak k_c, β a δ.

6.2.2 Výsledky

V této kapitole jsou prezentovány výsledky numerického výpočtu neustáleného toku stlačitelné visko-plastické kapaliny v dokonalé tuhé trubici. Trubice je rozdělena na 9 částí a má parametry: vnitřní průměr d = 8 mm a délka l = 9 m.



Obr. 6.2 Časové průběhy simulovaných průtoků Q_1 na vstupu, Q_2 uprostřed a Q_3 na konci trubice; okrajové podmínky: průtok na vstupu do trubice – funkce sinus (amplituda $Q_A = 2.10^{-6}$ m^3.s^{-1}, posunutí $Q_p = 6.10^{-5}$ m^3.s^{-1}, perioda $T = 2$ s) a tlak na výstupu z trubice je konstantní ($p = 100$ kPa)

Časový krok výpočtu má hodnotu $\Delta t = 1.10^{-4}$ s. Fyzikální vlastnosti plastického maziva jsou: $\tau_0 = 60$ Pa, $\eta_B = 2$ Pa.s, $\rho = 900$ kg.m^{-3}, $K = 2.10^6$ Pa. Doba řešení je $t = 2$ min. Výpočet byl proveden pro dva různé vstupní průtoky, tj. na vstupu do trubice je definována průtoková okrajová podmínka jako: (a) rampová funkce a (b) funkce sinus. Průtoková funkce sinus má následující parametry: amplituda $Q_A = 2.10^{-6}$ m^3.s^{-1}, perioda $T = 2$ s. Na výstupu z trubice je definována tlaková okrajová podmínka $p = 1.10^5$ Pa. Na obr. 6.2 jsou zobrazeny simulované průběhy průtoků na vstupu do trubice, uprostřed a na jejím konci.

Z řady provedených numerických výpočtů jsou patrná následující omezení: (a) parametry trubice: průměr $d_{min} = 8$ mm, (b) fyzikální vlastnosti maziva $\tau_{0max} = 60$ Pa, $\eta_{Bmax} = 2$ Pa.s, $Q_{min} = 4.10^{-5}$ m^3.s^{-1}, časový krok $\Delta t_{max} = 1.10^{-4}$ s. Z tohoto důvodu nebylo možné provést simulaci pro průměry trubic, tj. $d = 4$ a 6 mm, průtok $Q_{min} = 5.10^{-8}$ m^3.s^{-1} a fyzikální vlastnosti plastického maziva Plantogel 2S, tj. $\tau_0 = 297{,}54$ Pa a $\eta_B = 4{,}70$ Pa.s.

6.3 NEUSTÁLENÝ TOK VISKO-ELASTICKO-PLASTICKÉ KAPALINY

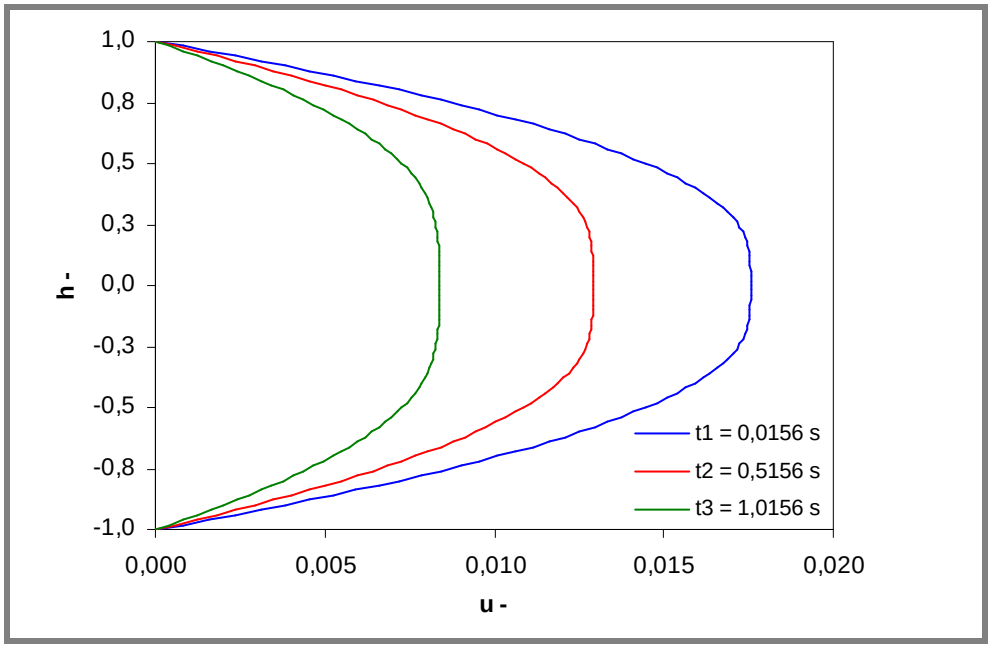
6.3.1 Postup numerické simulace

V kap. 4.1.3 byla uvedena pohybové rovnice visko-elasticko-plastické kapaliny (4.22) popisující oscilační tok mezi dvěma rovnoběžnými deskami [25]. U této kapaliny uvažujeme jediný elastický parametr, kterým je relaxační čas λ_1.

Výsledné vztahy byly pomocí diferenčních vztahů upraveny k numerickému řešení. Do numerických vztahů byly dále dosazeny experimentálně stanovené konstanty plastického maziva Plantogel 2S. Mezi tyto konstanty patří: mez toku τ_0 = 297 Pa, Binghamova viskozita η_B = 4,7 Pa.s, a také hodnota modulu pružnosti ve smyku G = 2600 Pa. Hodnota relaxačního času λ_1 byla vypočítána, tj. $\lambda_1 = \eta_B/G$ = 0,0018 s. Kapalina je buzena periodickým tlakovým spádem. Parametry tlakového buzení jsou: amplituda $p_{x1} = 0{,}05.10^6$ Pa, posunutí tlakového spádu v kladném směru $p_{x1} = 0{,}2.10^6$ Pa a úhlová rychlost ω = 3,14 rad.s^{-1}. Simulace byla provedena s časovým krokem $\Delta t = 1.10^{-4}$ s.

6.3.2 Výsledky

K numerické simulaci byl v prostředí Matlab vytvořen program. Na obr. 6.3 jsou uvedeny výsledky simulace pro časový úsek t = 0,0156-1,0156 s, ve kterém dochází k poklesu tlakového spádu. Jsou zde zobrazeny tři tvary bezrozměrných rychlostních profilů pro časové okamžiky t_1 = 0,0156 s, t_2 = 0,5156 s, t_3 = 1,0156. V prostřední části je viditelná pístová část toku kapaliny. Vzhledem k nízké frekvenci tlakového buzení nevykazují bezrozměrné rychlostní profily žádné zásadní odchylky od tvaru ustáleného rychlostního profilu visko-plastické kapaliny. V případě, že bude zaveden budící tlakový spád s vyšší úhlovou frekvencí, bude několik period trvat, než dojde k ustálení hodnot rychlostí.



Obr. 6.3 Simulace neustáleného toku visko-elasticko-plastické kapaliny mezi rovnoběžnými deskami; bezrozměrný rychlostní profil kapaliny; konstanty numerické simulace: τ_0 = 297 Pa, η_B = 4,7 Pa.s, G = 2600 Pa, ω = 3,14 rad.s^{-1}, h = 0,008 m, λ_1 = 0,002 s, ρ = 900 kg.m^{-3} (pokles tlakového spádu)

Vytvořený program bude dále využit ke studiu toku plastických maziv za různých provozních stavů, tj. s různým tlakovým buzením.

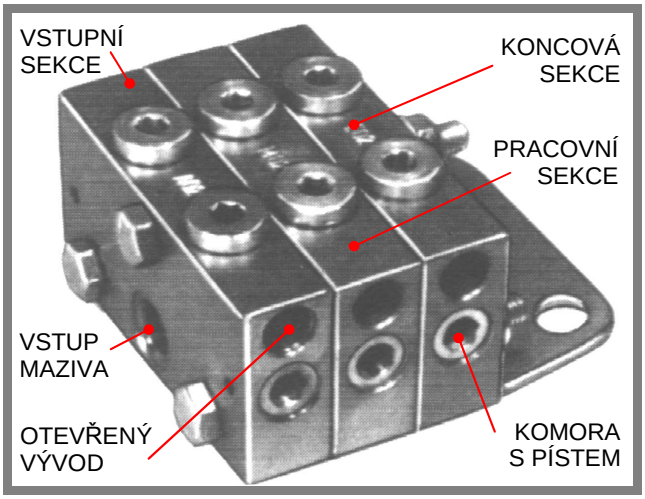
7 NÁVRH PROGRESIVNÍCH SYSTÉMŮ POMOCÍ GENETICKÝCH ALGORITMŮ

7.1 NÁVRH KONSTRUKCE PROGRESIVNÍCH ROZDĚLOVAČŮ

K návrhu rozdělovačů byl v objektově orientované platformě Java [7] a poté v prostředí Matlab vytvořen vlastní program, ve kterém je implementován GA [5], [6]. Tento program slouží k nalezení nejvhodnějších konstrukcí rozdělovačů ZP-A až ZP-D, viz obr. 7.1, na základě následujících vstupních požadavků:

- typ sekcí,
- počet sekcí,
- počet otevřených vývodů progresivního rozdělovače,
- poměr dělení maziva v rozdělovači,
- parametry GA optimalizačního programu.

Operátor křížení byl v programu vynechán, neboť se ve své podstatě jedná o speciální případ mutace [14].



Obr. 7.1 Progresivní rozdělovač ZP-A se třemi sekcemi [38]

7.1.1 Algoritmus programu

Návrhový program je blíže popsán v dizertační práci. Jeho podstatnou část tvoří GA. Stručně jej může popsat následovně. Počáteční populace je v programu vytvořena pomocí generátoru pseudonáhodných čísel a je uložena ve dvojrozměrném poli, se kterým jsou prováděny další operace. Velikost tohoto pole je dána délkou chromozomu L rozdělovačů a velikosti populace N. Chybně vygenerované chromozomy, tj. konstrukční varianty progresivních rozdělovačů, jsou programem opraveny. K tomu slouží několik typů opravných algoritmů. Opravené chromozomy jsou ohodnoceny pomocí tzv. účelové funkce (fitness), viz (7.1) a poté je populace podrobena selekci. V programu je implementována turnajová selekce, viz kap. 7.1.4. Selekcí jsou z původní populace vybráni jedinci s lepší hodnotou fitness, kteří dále postupují do nové generace. Protože není algoritmem selekce

zaručeno, že do nové generace postoupí vždy nejlepší jedinec z populace, je v programu dále implementován tzv. elitismus. Nejlepší jedinec je v populaci vyhledán a je automaticky zkopírován do nové generace, nichž by se podroboval turnajové selekci, jako ostatní jedinci. Následně jsou jedinci populace s pravděpodobností P_m mutováni. Nad každým genem chromozomu je proveden náhodný pokus a s výše uvedenou pravděpodobností je gen změněn. Mutací mohou být vytvořeni chybní jedinci, proto jsou programem opět použity opravné algoritmy, které případné chyby opraví. Opravené chromozomy jsou dále vyhodnoceny pomocí účelové funkce a celý cyklus genetického algoritmu se opět opakuje, dokud nebude splněna ukončující podmínka cyklu FOR, tj. počet zadaných iterací (vývojových generací). Po ukončení výpočtu jsou všechny výsledky uloženy do souborů a dále je proveden stručný výpis vybraných výsledků na obrazovku počítače, např. průměrné hodnoty fitness populací, nejlepší hodnoty fitness jedinců apod.

7.1.2 Způsob zakódování progresivních rozdělovačů

Celočíselné kódování je vhodný způsob, jak interpretovat nezbytné a dostačující informace o konstrukčním provedení rozdělovačů. V tab. 7.1 je představen způsob, jak provést kódování u rozdělovačů ZP-A až ZP-D.

Tab. 7.1 Chromozóm n-sekčního progresivního rozdělovače ZP-A až ZP-D (střídání genů A_S až F_S v chromozómu)

sekce	1. sekce						…	i-tá sekce						…	n-tá sekce					
gen	A_s	B_s	C_s	D_s	E_s	F_s		A_s	B_s	C_s	D_s	E_s	F_s		A_s	B_s	C_s	D_s	E_s	F_s

Tab. 7.2 Význam genů v chromozomech progresivních rozdělovačů ZP-A až ZP-D

pořadí genů v řetězci	gen	význam genu
1	A_s	velikost sekce [cm^3/zdvih]
2	B_s	spojení vývodů sekce (1 = ano, 0 = ne)
3	C_s	spojení levých vývodů sekcí (1 = ano, 0 = ne)
4	D_s	spojení pravých vývodů sekcí (1 = ano, 0 = ne)
5	E_s	otevření/uzavření levého vývodu sekce (1 = ano, 0 = ne)
6	F_s	otevření/uzavření pravého vývodu sekce (1 = ano, 0 = ne)

U rozdělovačů ZP-A, které mají modulární stavbu, je pro každou sekci dostačující, aby byla kódována šesti celými čísly. Tzn., že progresivní rozdělovač ZP-A se šesti sekcemi bude zakódován řetězcem o celkové délce 36 číslic, viz tab. 7.1. Význam genů v chromozómu je patrný z tab. 7.2.

Pokud se jedná o progresivní rozdělovač ZP-A (ZP-C), mohou mít pracovní komory sekcí velikost: 0.07, 0.1, 0.2 nebo 0.3 cm^3/zdvih. U rozdělovačů ZP-B (ZP-D) mají sekce velikost: 0.5, 1.2 a 2.0 cm^3/zdvih.

7.1.3 Výpočet mazacích dávek u rozdělovačů ZP-A až ZP-D

Na základě zavedeného systému veličin, tj. objemů vstupujících (vystupujících) ze sekcí progresivních rozdělovačů ZP-A až ZP-D, byly získány výpočtové vztahy, pomocí kterých lze stanovit mazací dávky, tj. množství maziva, které je vytlačeno z vývodů rozdělovačů během jejich jednoho pracovního cyklu [$cm^3.cyklus^{-1}$]. Tyto výpočtové vztahy byly implementovány v programu. Jejich tvar, význam a odvození je uvedeno v dizertační práci. Vypočítané hodnoty mazacích dávek jsou poté porovnávány s požadovanými objemy. K tomu slouží tzv. účelová (hodnotící) funkce (fitness).

7.1.4 Hodnotící funkce (fitness) a selekce

V programu, který byl vytvořen k návrhu progresivních rozdělovačů ZP-A až ZP-D, byla navržena hodnotící funkce fitness ve tvaru [27]

$$HF_i = \sum_{j=1}^{m-1} abs\left(\frac{VV_{i,j+1}}{VV_{ij}} - \frac{VP_{i,j+1}}{VP_{ij}}\right), \tag{7.1}$$

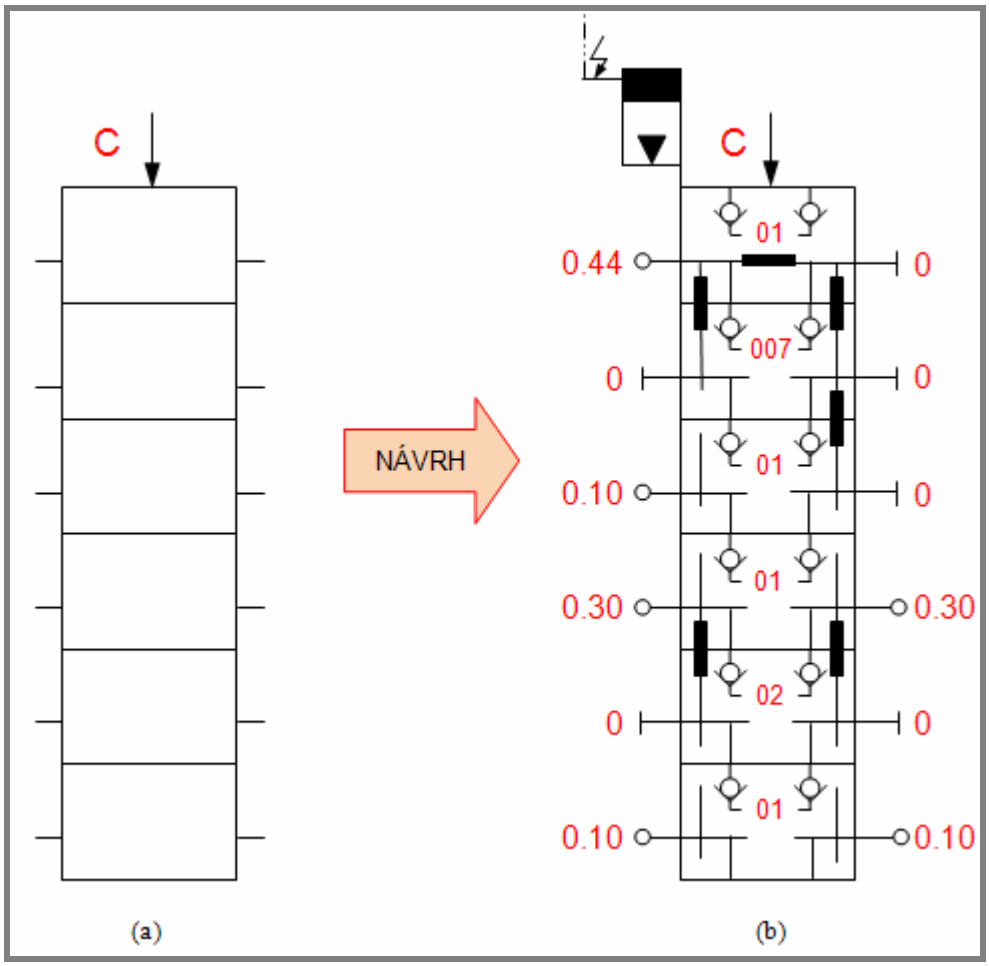
kde: VP_{ij} je požadovaný objem maziva vytlačený během jednoho pracovního cyklu z *j*-tého vývodu *i*-tého rozdělovače populace [$cm^3 cyklus^{-1}$], VV_{ij} je vypočítaný objem maziva vytlačený z *j*-tého vývodu *i*-tého rozdělovače během jednoho pracovního cyklu, $i \in \langle 1;n \rangle$ a $j \in \langle 1;m \rangle$; *n* je počet jedinců v populaci, *m* je počet otevřených vývodů progresivního rozdělovače ZP-A. Požadované a vypočítané objemy jsou před použitím fitness funkce seřazeny vzestupně a poté se porovnávají, tzn., že nejsou vázány na konkrétní otevřené vývody rozdělovače.

V návrhovém programu byl implementován mechanismus turnajové selekce, tzv. tournament selection, [14]. Princip byl blíže popsán v dizertační práci.

7.1.5 Optimalizace progresivního rozdělovače ZP-A

Pomocí programu byl proveden návrh rozdělovače pro tyto požadavky: (a) typ rozdělovače ZP-A, (b) šest sekcí, (c) šest otevřených vývodů, (d) poměr dělení maziva 0,5:0,5:0,5:1,6:1,6:2,4, (e) parametry GA, tj. velikost populace N = 500, selekční tlak t_T = 3 a pravděpodobnost mutace P_m = 1/30, počet iterací během výpočtu PI = 200. Na základě definovaných vstupních požadavků, viz obr. 7.2a, jsou návrhovým programem nalezena konstrukční provedení rozdělovače ZP-A. Jedno z nejlepších řešení je znázorněno na obr. 7.2b. Hodnota účelové funkce (fitness) tohoto řešení je s použitím vztahu (7.1) HF_i = 0,23. Stejným způsobem byly počítány hodnoty účelové funkce pro ostatní jedince, tj. progresivní rozdělovače.

V programu byly dále vypočítány statistické veličiny, tj. průměrná hodnota fitness u jedinců v populaci, nejlepší hodnoty fitness jedinců v populaci, rozptyl fitness jedinců v populaci a počet nejlepších fitness jedinců. Parametry GA, tj. selekční tlak t_T a pravděpodobnost mutace P_m, byly v programu odladěny [27].



Obr. 7.2 Návrh progresivního rozdělovače ZP-A (DELIMON) se 6-ti sekcemi a 6-ti otevřenými vývody pomocí optimalizačního programu; (a) vstupní požadavky na rozdělovač ZP-A, (b) výsledné konstrukční provedení rozdělovače ZP-A

7.2 OPTIMALIZACE VĚTVENÝCH PROGRESIVNÍCH SYSTÉMŮ

7.2.1 Úvod

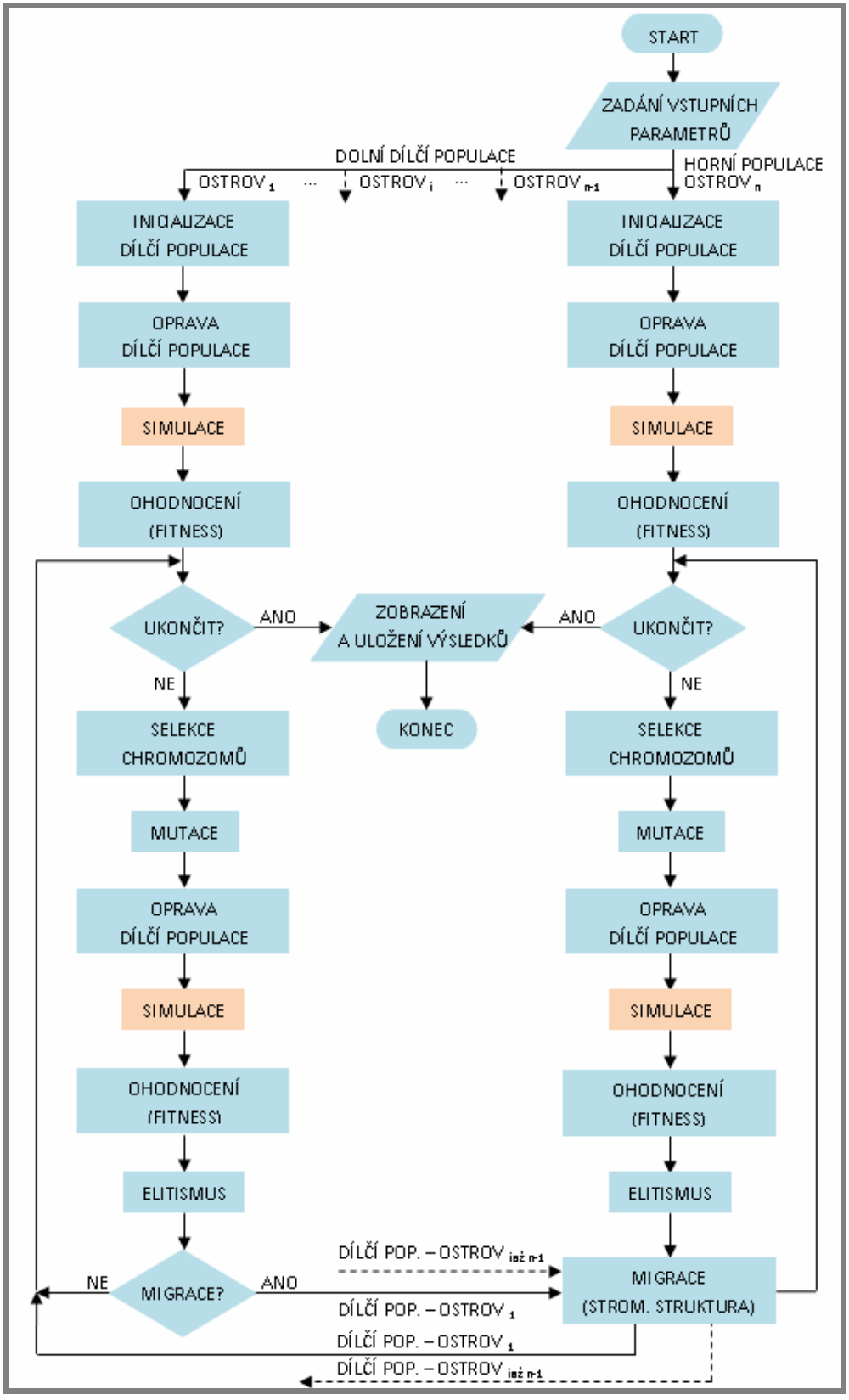
Programové zpracování bylo provedeno v prostředí MATLAB. Pomocí programu je možné navrhovat progresivní systémy s jedním hlavním rozdělovačem a více vedlejšími rozdělovači ZP-A až ZP-D. Vstupní data programu jsou popsána v dizertační práci. Jedná se o: požadavky na progresivní systém a mazací místa, parametry mazacího přístroje, fyzikální vlastnosti maziva, parametry potrubí, parametry PGA apod.

7.2.2 Typ použitého PGA v optimalizačním programu

V programu je použita hierarchická struktura PGA. Jedná se o migrační model s dvojúrovňovou hierarchickou strukturou. Migrační model PGA simuluje proces reprodukce lépe než sekvenční GA. Nad každou podpopulací běží normální sekvenční GA s místním řízením [14]. Po určitém počtu generací (migrační interval, migrační rychlost) dojde k migraci a z každé dolní podpopulace je vybrán stejný počet nejlepších jedinců, kteří obohatí horní podpopulaci [14].

7.2.3 Vývojový diagram optimalizačního programu

Na obr. 7.3 je znázorněn vývojový diagram optimalizačního programu. Jak je z obrázku patrné, jedná se o paralelní strukturu.



Obr. 7.3 Vývojový diagram optimalizačního programu s PGA

7.2.4 Způsob zakódování progresivních systémů

Kódování progresivních systémů je provedeno celočíselně a je rozšířením toho, jak byly reprezentovány rozdělovače, viz kap. 7.1.2. Část kódu progresivního systému reprezentuje rozdělovače ZP-A až ZP-D. Další část kódu v sobě zahrnuje informace o potrubí progresivního systému, tj. o průměrech, délkách, použitém materiálu a způsobu zapojení rozdělovačů v obvodu. Na každé potrubí připadají 3 číslice a zapojení hlavního a vedlejších rozdělovačů lze provést řadou celých čísel, jejichž počet odpovídá počtu vedlejších rozdělovačů v progresivním systému.

Tab. 7.3 Chromozómy progresivních systémů s rozdělovači ZP-A až ZP-D (dvouúrovňová struktura)

SKUPINA	PROGRESIVNÍ ROZDĚLOVAČE							POTRUBÍ			
význam	hlavní	1-ní vedlejší	.	i-tý vedlejší	.	n-tý vedlejší		materiál	D	l	zapojení
gen	$A_S B_S C_S D_S E_S F_S$	$A_S B_S C_S D_S E_S F_S$	.	$A_S B_S C_S D_S E_S F_S$	.	$A_S B_S C_S D_S E_S F_S$		G_{PS}	H_{PS}	I_{PS}	J_{PS}

Kódování uvedeným způsobem je nejvhodnější pro progresivní systémy s jedinou větvenou strukturou.

7.2.5 Hodnotící funkce (fitness) a selekce

K určení kvality jedinců v podpopulacích (progresivní systémy představující možné řešení optimalizačního problému), byla navržena hodnotící funkce ve tvaru

$$HF = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left\{ V_1 H\left(VV_{ij} - VP_{ij}\right) + V_2 \left[1 - H\left(VV_{ij} - VP_{ij}\right)\right] \right\} abs\left(VV_{ij} - VP_{ij}\right), \tag{7.2}$$

kde: VP_{ij} – je požadovaný objem maziva, který má být vytlačený z *i*-tého rozdělovače a jeho *j*-tého vývodu během jedné pracovní fáze progresivního systému do prostoru mazacího místa [cm^3fáze^{-1}], VV_{ij} – vypočítaný objem maziva, který bude vytlačen z *i*-tého rozdělovače a jeho *j*-tého vývodu během jedné pracovní fáze progresivního systému do prostoru mazacího místa [cm^3fáze^{-1}], *i* je počet rozdělovačů, které přímo dopravují mazivo do mazacích míst a *j* je počet vývodů určitého rozdělovače, kterými je mazivo přímo distribuováno; $i \in \langle 1;n \rangle$ a $j \in \langle 1;m \rangle$. Funkce *H* ve vztahu (7.2) je Heavisidova skoková funkce. Pro VV_{ij}-$VP_{ij} > 0$ bude mít tato funkce hodnotu 1. V případě, že VV_{ij}-$VP_{ij} > 0$, bude mít Heavisidova funkce nulovou hodnotu. Veličiny V_1 a V_2 označují váhy.

V programu je zavedena turnajová selekce. Selekční tlak lze nastavit zvlášť pro dolní podpopulace t_{Tdi} a horní populaci t_{Th}.

7.2.6 Migrace

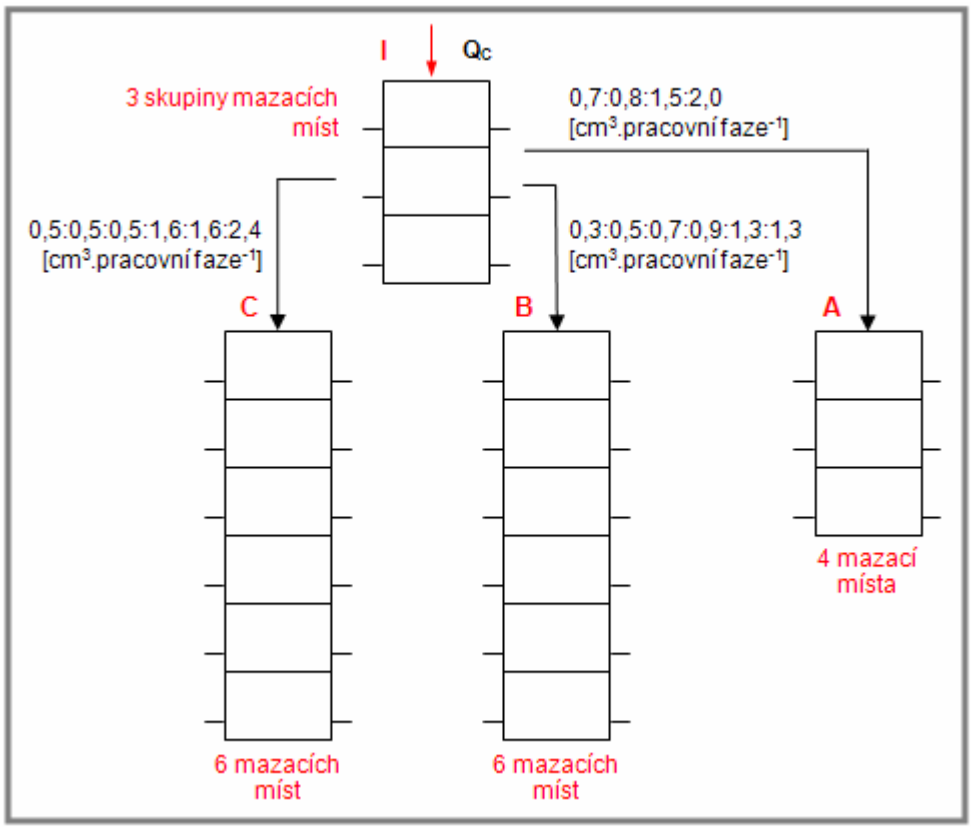
Migraci jsou nahrazení nejhorší jedinci v horní podpopulaci nejlepšími jedinci z dolních podpopulací. Migraci lze v programu nastavit pomocí parametrů: (a) počet jedinců migrujících z každé dolní populace do horní populace P_{MJ} a (b) migrační interval, tj. počet cyklů programu mezi jednotlivými migracemi *MI*.

7.2.7 Optimalizace progresivního systému s rozdělovači ZP-A

Pomocí programu byl proveden návrh progresivního systému s jedním hlavním rozdělovačem a třemi vedlejšími rozdělovači. Jedná se o menší progresivní systém s dvouúrovňovou strukturou. Vstupní data programu jsou:

- Požadavky na progresivní systém
  - Typ rozdělovačů (ZP-A)
  - Hierarchie (1 hlavní a 3 vedlejší rozdělovače)
  - Počet sekcí rozdělovačů (3 sekce – hlavní, 6, 6 a 3 sekce – vedlejší)
  - Počet mazacích míst 16
- Požadavky mazacích míst
  - Rozdělovač A (0.7, 0.8, 1.5 a 2,0 cm^3.$fáze^{-1}$)
  - Rozdělovač B (0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.3 a 1,3 cm^3.$fáze^{-1}$)
  - Rozdělovač C (0.5, 0.5, 0.5, 1.6, 1.6 a 2,4 cm^3.$fáze^{-1}$)
- Parametry PGA
  - Dolní populace (5 x N_{di} = 50, selekční tlak t_{Tdi} = 2, P_{mdi} = 35)
  - Horní nadřazená populace (N_h = 50, t_{Th} = 2, P_{mh} = 35)
  - Společné parametry (*PI* = 50, P_{MJ} = 5x1, *MI* = 1, přemazaní = 1,05)

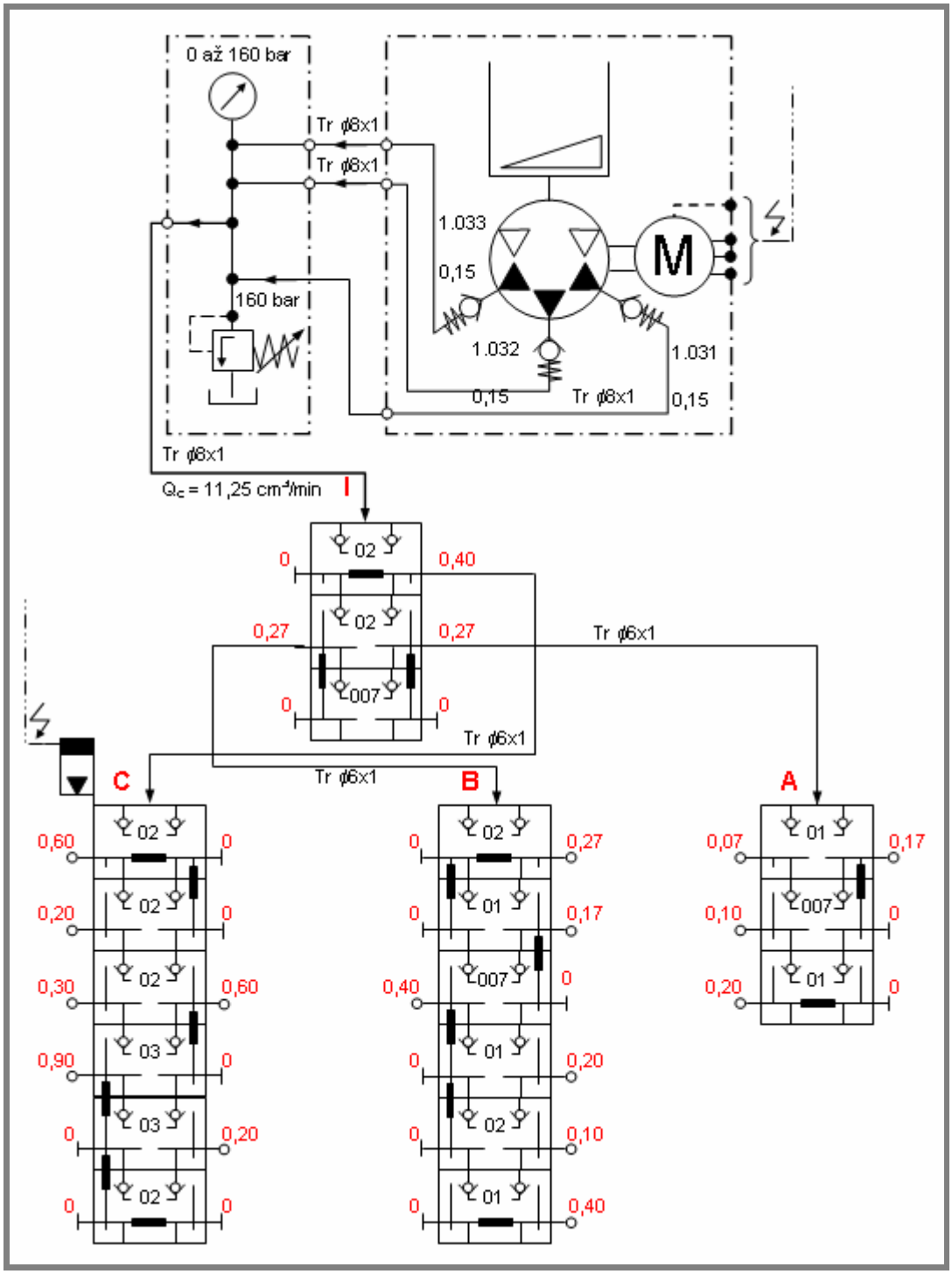
Po zadání vstupních dat do programu byl proveden výpočet. Na obr. 7.9 je zobrazena základní podoba progresivního systému. Jedno z nejlepších nalezených řešení je uvedeno na obr. 7.10. Hodnota hodnotící funkce, pro zobrazený progresivní systém, je dle (7.2) *HF* = 1,7.



Obr. 7.4 Tvar navrhovaného progresivního systému s rozdělovači ZP-A [26]

Jak je patrné z obr. 7.5, jsou splněny všechny požadavky mazacích míst (k mazacím místům bude buď dodáno potřebné množství maziva, nebo bude nanejvýš do 15-ti % přemazáno).

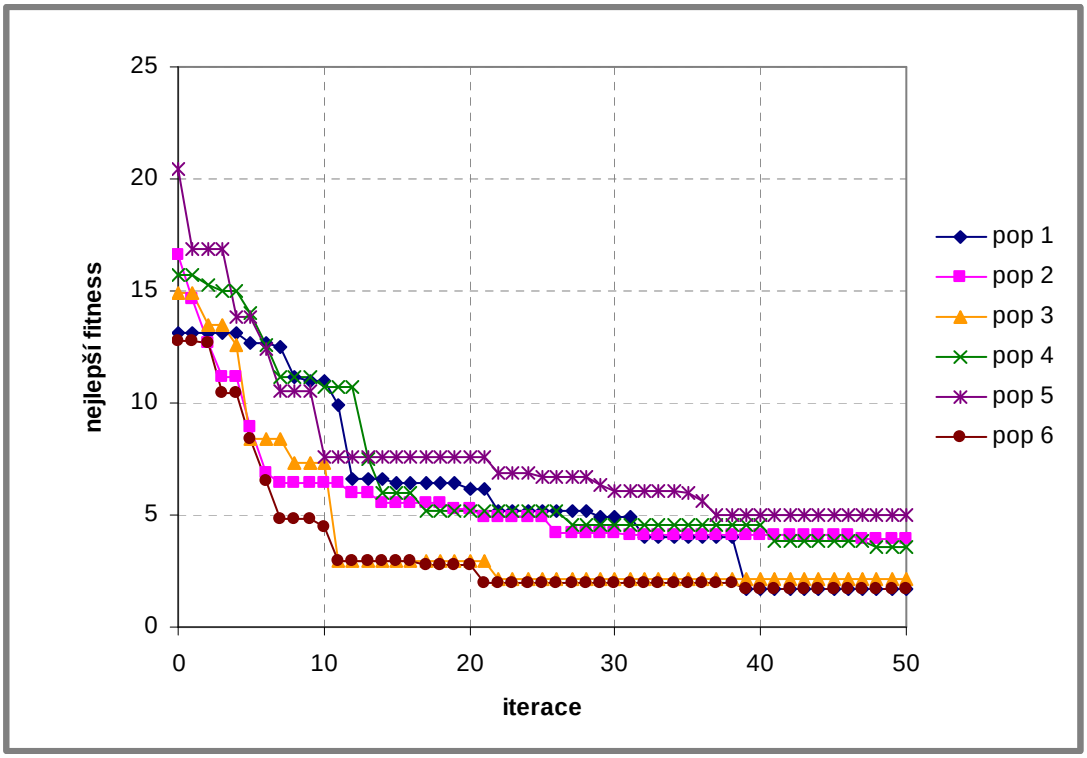
Kód jednoho z nejlepších progresivních systémů, který je uveden na obr. 7.5 je: 3100013011111000002001111000102100103110012001011010102010013000012100013101103000103001114010104010013100001111111111111111888888888888888555555555555555555321.



Obr. 7.5 Schéma progresivního systému s jedním hlavním rozdělovačem a třemi vedlejšími rozdělovači (jedna z nejlepších variant vyhovující vstupním požadavkům programu) [26]

Na obr. 7.6 jsou znázorněna statistická data získaná během výpočtu návrhového programu. Jedná se o nejlepší hodnotu fitness. Populace 1 až 5 označují dolní populace a populace 6 označuje horní nadřazenou populaci.

Jak je patrné z obr. 7.6, evoluční proces v horní nadřazené populaci konverguje rychleji a k lepším výsledkům, než je tomu v případě dolních dílčích populací. Je to díky migraci, která obohacuje horní populaci o genetický materiál. Dílčí populace o velikosti 50-ti jedinců jsou dostatečně velké k dosažení kvalitních výsledků.



Obr. 7.6 Nejlepší hodnota fitness funkcí v populacích během výpočtu (velikosti dílčích populací N_{di} = 50, N_h = 50; selekční tlak t_{Tdi} = 2, t_{Th} = 2; pravděpodobnosti mutace P_{mdi} = 1/35, P_{mh} = 1/35; počet iterací (generací) výpočtu PI = 50; počet migrujících jedinců P_{MJ} = 5, migrační interval MI = 1)

Samotný výpočet, dle zadaných vstupních požadavků, trval optimalizačnímu programu cca 1min (program MATLAB, verze 2006b a hardwarova konfigurace počítače: procesor Intel(R) Core(TM) 2 CPU 6300 @ 1,86 GHz, paměť (RAM) 1,00 GB). Doba výpočtu se prodlouží v závislosti na tom, jak velký progresivní systém bude navrhován.

8 ZÁVĚR

Tato disertační práce shrnuje výsledky vývoje softwarových programů, určených pro návrh konstrukce rozdělovačů a progresivních mazacích systémů. První program, ve kterém je implementován GA, slouží k návrhu rozdělovačů. Druhý program, jehož součástí je PGA, byl vyvinut k návrhu progresivních systémů. Dále jsou zde prezentovány výsledky teoretického a početního řešení toku plastických

maziv v časovém prostoru. Odvozeny byly vztahy k numerickému řešení toku stlačitelné visko-plastické binghamské kapaliny. Provedena byla experimentální měření s plastickým mazivem Plantogel 2S zejména za účelem stanovení rychlosti zvuku [64]. Ta byla stanovena početně metodou přenosových matic [12], [28] a [31]. Dále byly analyzovány možnosti využití metody přenosových matic k řešení toku visko-plastických kapalin ve frekvenční oblasti. Numericky byl řešen problém neustáleného toku plastického maziva Plantogel 2S, jako visko-elasticko-plastické kapaliny s jediným elastickým parametrem.

Prokázalo se, že program určený k návrhu konstrukce progresivních rozdělovačů ZP-A až ZP-D je vhodným nástrojem k optimalizaci jejich konstrukce. Z výsledků uvedených v kap. 7.2 je zřejmé, že program určený k návrhu progresivních systémů z rozdělovači ZP-A až ZP-D je užitečný nástroj pro projekční praxi.

Poprvé byla stanovena rychlost zvuku v plastickém mazivu Plantogel 2S [31]. Jak je patrné, rychlost zvuku má v tomto plastickém mazivu poměrně nízkou hodnotu, což je dáno velkým tlumením kapaliny, a její možná závislost na statickém tlaku v trubici je spekulativní.

V disertační práci bylo uvedeno odvození pohybové rovnice visko-plastické kapaliny. Tato rovnice byla s rovnicí kontinuity použita k odvození vztahů za účelem numerického řešení toku stlačitelné visko-plastické kapaliny. K tomu byla aplikována numerická metoda Lax-Wendroff. Tyto výpočetní vztahy byly použity k simulaci toku plastického maziva Plantogel 2S a do odvozených vztahů byla dosazena hodnota rychlosti zvuku.

Stručná analýza vztahů v [23] ukazuje, že existuje možnost využití metody přenosových matic k řešení toku visko-plastických látek ve frekvenční oblasti.

Program vytvořený k numerické simulaci toku visko-elasticko-plastických kapalin je užitečný ke studiu toku plastických maziv. V kap. 6.3 jsou zobrazeny výsledky simulace pro plastické mazivo Plantogel 2S. Základem numerického modelu jsou vztahy uvedené v kap. 4.1.3 a reologické konstanty tohoto plastického maziva. K provedení simulace byla použita metoda konečných diferencí. Simulace vykazovala dobrou numerickou stabilitu.

K praktickému využití a snadnému ovládání programů k návrhu rozdělovačů a progresivních systémů by bylo zapotřebí přinejmenším vytvořit uživatelská grafická rozhraní. Ve druhém návrhovém programu, který slouží k návrhu progresivních systémů, by měla být dokončena část sloužící k simulaci toku maziva. K odstranění problémů s numerickou nestabilitou, u programu na simulaci toku visko-plastické binghamské kapaliny, by měly být odzkoušeny tyto úpravy: odvození výpočtových vztahů v bezrozměrném tvaru, namísto explicitního schématu metody Lax-Wendroff stojí za úvahu použít implicitní schéma, což povede k řešení soustavy rovnic v každém časovém kroku apod. Dále by měly být dále hlouběji analyzovány možnosti, jak využít metodu přenosových matic také pro řešení toku visko-plastických kapalin ve frekvenční oblasti.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] BRDIČKA, M. – SAMEK, L. – SOPKO, B. *Mechanika kontinua*. Vydání 2. opravené, 2000. Praha: Academia, nakladatelství AV ČR, c2000. 799 s. ISBN 80-200-0772-5

[2] GIESEKUS, H. W. *Phänomenologische Rheologie, Eine Einführung*. Vydání 1., 1994. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994. 659 s. ISBN 3-540-57513-8

[3] ZELINKA, I. *Umělá inteligence v problémech globální optimalizace*. Vydání 1., 2002. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, c2002. 189 s. ISBN 80-7300-069-5

[4] GEN, M. – CHENG, R. *Genetic Algorithms & Engineering Design*. Vydání 1., 1997. New York: Nakladatelství John Wiley & Sons, Inc., c1997. 411 s. ISBN 0-471-12741-8

[5] ZAPLATÍLEK, K. – DOŇAR, B. *Matlab. Tvorba uživatelských aplikací*. Vydání 1., 2004. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, c2004. 216 s. ISBN 80-7300-133-0

[6] ZAPLATÍLEK, K. – DOŇAR, B. *Matlab. Začínáme se signály*. Vydání 1., 2006. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2006. 272 s. ISBN 80-7300-200-0

[7] HEROUT, P. *Java – bohatství knihoven*. Vydání 2., rozšířené a upravené, 2006. České Budějovice: Nakladatelství KOPP, c2006. 251 s. ISBN 80-7232-288-5

[8] CZARNY, R. *Smary plastyczne*. Vydání 1., 2004. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, c2004. 287 s. ISBN 83-204-3020-8

[9] WEIN, O. *Úvod do reologie*. Vydání 1., 1996. Brno: Malé Centrum, FCH VUT Brno, c1996. 84 s

[10] KARKENAHALLI, S. – FLETCHER, C. A. J. Computational Techniques for Fluid dynamics. A Solutions Manual. Berlin: Springer-Verlag, c1992. 256 s. ISBN 3-540-54304-X

[11] WENDT, J. F. Computational fluid dynamics: an introduction. Vydání 2., 1996. Berlin: Springer-Verlag, c1996. 301 s. ISBN 3-540-59471-X

[12] HABÁN, V. *Tlumení tlakových a průtokových pulsací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Odbor hydraulických strojů V. Kaplana, 1999. 57 s. Školitel Prof. Ing. František Pochylý, CSc. Disertační práce

[13] KOYŠ, J. *Modelování tlakových pulsací v pružných potrubích*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Odbor fluidního inženýrství V. Kaplana, 2007. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Habán, Ph.D

[14] OŠMERA, P. *Genetické algoritmy a jejich aplikace. Využití biologických a fyzikálně-informačně principů evoluce*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky, 2001. 108 s. Habilitační práce

[15] VEPŘEK, J. *Optimalizace průtokových poměrů v mazacích obvodech s progresivními rozdělovači pomocí genetických algoritmů*. Vysoké učení technické

v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2006. 43 s. Školitel Doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc. Pojednání ke státní doktorské zkoušce
[16] DVOŘÁK, A. Větvené mazací systémy a jejich proudové poměry – tribologicko – hydraulické aspekty. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2006. 91 s. Školitel Doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc. Disertační práce
[17] FIALA, P. *Stanovení charakteristik vybraných hydraulických prvků mazacích obvodů a jejich simulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Odbor fluidního inženýrství V. Kaplana, 2006. 68 s. Vedoucí diplomové práce Doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.
[18] ZBOROVSKÁ, B. Tlakové ztráty při toku ekologických plastických maziv vybranými prvky centrálních mazacích systémů. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Odbor fluidního inženýrství V. Kaplana, 2004. 90 s. Vedoucí diplomové práce Doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.
[19] SCROFANI, G. *Numerical Basin Modeling and Tectonics*. Milano: Politecnico di Milano, 2007. 147 s. Školitel Prof. Fausto Saleri. Disertační práce
[20] SOCHI, T. *Pore-Scale Modeling of Non-Newtonian Flow in Porous Media*. Londýn: Imperial College London. Department of Earth Science and Engineering, 2007. 165 s. Školitel Prof. Martin Blunt
[21] NĚMEC, M. *Tok ekologického plastického maziva progresivním rozdělovačem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Odbor fluidního inženýrství V Kaplana, 2004. 114 s. Vedoucí diplomové práce Doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.
[22] NOVÁKOVÁ, M. *Analýza toku plastického maziva větveným centrálním mazacím systémem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Odbor hydraulických strojů V. Kaplana, 1999. 72 s. Vedoucí diplomové práce Doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.
[23] OSPINA, J. – VELEZ, M. Analytical Solution for Transient Flow of a Generalized Bingham Fluid with Memory in a Movable Tube Using Computer Algebra. In *Computer Algebra in Scientific Computing*. Springer Berlin/Heidelberg, 2007. s. 339-349. ISBN 978-3-540-75186-1
[24] CHEDDADI, I. et al. Numerical modelling of foam Couette flows. *The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics*, April 2009, vol. 27, no. 2, s. 123-133. ISSN 1292-8941
[25] WANG, Y. Time-dependent Poiseuille flows of visco-elasto-plastic fluids. *Acta Mechanica*, October 2006, vol. 186, no. 1-4, s. 187-201. ISSN 0001-5970
[26] VEPŘEK, J. Design of progressive distributors in centralized lubrication systems by genetic algorithms. *Hydraulika i Pneumatika*, May 2008, no. 5, s. 21-27. ISSN 1505-3954
[27] VEPŘEK, J. Determining Genetic Algorithm Operators in the Program for Optimization of Progressive Distributors. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Soft Computing Applied in Computer and Economic Environments.*

ICSC 2008. 25 January, Kunovice, Czech Republic. I. Rukovanský, P. Ošmera (eds.). Kunovice: EPI Kunovice, 2008. s. 183-190. ISBN 978-80-7314-134-9
[28] HABÁN, V. - KOUTNÍK, J. - POCHYLÝ,F.: Popis k programu „F-ACHAR“. Program pro řešení pulsací ve větvených hydraulických obvodech metodou přenosových matic, rozšířený o výpočet vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů. Výzkumná zpráva Odboru hydraulických strojů V. Kaplana. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 1999. 30 s. VUT-EU-QR-49-99
[29] NEVRLÝ, J. – PAVLOK, B. Metodika návrhu větvených mazacích obvodů s podporou moderních výpočetních systémů. Výzkumná zpráva Odboru hydraulických strojů V. Kaplana. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2000. 267 s. GAČR 101/98/0946
[30] ŠTERN, P. – NEVRLÝ, J. – PAVLOK, B. Tokové křivky a viskoelastické charakteristiky vybraných ekologických maziv. Dílčí výzkumná zpráva ke grantovému úkolu GAČR 101/02/0605. Česká akademie věd v Praze, Ústav pro hydrodynamiku, 2004. 20 s.
[31] HABÁN, V. – VEPŘEK, J. Početní stanovení rychlosti zvuku v plastickém mazivu Plantogel 2S. Experimentální měření toku plastického maziva Plantogel 2S. Výzkumná zpráva Odboru fluidního inženýrství V. Kaplana. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008. 25 s
[32] *Bijur Delimon Automatic Lubrication Systems* [online]. [citováno 5. 1. 2010]. Dostupné z URL <http://www.bijurdelimon.com>
[33] *Lincoln Industrial|Lubrication Systems, Grease Guns, Pumps, and Technical Service* [online]. [citováno 5. 1. 2010]. Dostupné z URL < http://www. lincolnindustrial.com/home. asp>
[34] *TriboTec – Centrální mazání.* [online]. [citováno 17. 1. 2010]. Dostupné z URL < http://.www.tribotec.cz/tribotec/cz/index.htm >
[35] *Špondr CMS*. [online]. [citováno 10. 1. 2010]. Dostupné z URL <http://www. spondrcms.cz/prep/prepc05.htm>
[36] *Fuchs oil.cz* [online]. [citováno 6. 1. 2010]. Dostupné z URL <http://www. fuchs-oil.cz/ index.php/produkty/produktove-rady/planto>
[37] *Verbrauchsschmierung – SKF lubricationsolutions/Produkte/Zentralschmier-systeme* [online]. [citováno 10. 1. 2010]. Dostupné z URL <http://www.skf. com/portal/skf_lub/home/products?contentId=873201&lang=de>
[38] ŠPONDR-CMS. Centrální mazací systémy. [CD-ROM]. Catalogue-X10-X35e-Multi-Progressive. Katalogový list. 189 s. 2004, Brno

10 PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE

VEPŘEK, J. Design of progressive distributors in centralized lubrication systems by genetic algorithms. *Hydraulika i Pneumatika*, May 2008, no. 5, s. 21-27. ISSN 1505-3954

VEPŘEK, J. Určení mazacích dávek u progresivních rozdělovačů. *Acta hydraulica et pneumatica*, 2005, no. 2, s. 75-83. ISSN 1336-7536

NEVRLÝ, J. – ZBOROVSKÁ, B. – VEPŘEK, J. Dynamika toku ekologického plastického maziva. *Hydraulika a pneumatika*, 2004, ročník VI, no. 3-4, s. 29-31. ISSN 1335-5171

NEVRLÝ, J. – NĚMEC, M. – DVOŘÁK, A. – VEPŘEK, J. Zpřesnění matematického modelu rozdělovače plastického maziva, místní ztráty. Hydraulika a pneumatika, 2004, ročník VI, no. 3-4, s. 64-66. ISSN 1335-5171

VEPŘEK, J. Determining Genetic Algorithm Operators in the Program for Optimization of Progressive Distributors. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Soft Computing Applied in Computer and Economic Environments. ICSC 2008. 25 January, Kunovice, Czech Republic*. I. Rukovanský, P. Ošmera (eds.). Kunovice: EPI Kunovice, 2008. s. 183-190. ISBN 978-80-7314-134-9

VEPŘEK, J. Optimisation of Flow Rates in Progressive Distributors by Genetic Algorithms. In *Proceedings of International Scientific-Technical Conference Hydraulics and Pneumatics ´2007 (Napędy i Sterowania hydrauliczne i pneumatyczne ´2007). Domestic branch and challenges of competitiveness. Wroclaw, 10-12 October 2007*. Wroclaw: Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP we Wroclawiu, 2007. s. 64-73. ISBN 978-83-87982-27-0

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. ICSC 2007. 26 January, Kunovice, Czech Republic*. I. Rukovanský, P. Ošmera (eds.). Kunovice: EPI Kunovice, 2007. s. 71-79. ISBN 80-7314-108-6

VEPŘEK, J. – NEVRLÝ, J. Simulace toku plastických maziv. In *19. mezinárodní konference Hydraulika a pneumatika, Praha, 30.-31. 5. 2006*. Praha: Česká strojnická společnost, 2006. s. 276-285. ISBN 80-02-01809-5

NEVRLÝ, J. – NĚMEC, M. – DVOŘÁK, A. – VEPŘEK, J. Improved mathematical model results of grease distributor. In *Proceedings of the international scientific-technical konference Hydraulics and Pneumatics, Wroclaw, 17.-19. 5. 2005*. Wroclaw: Polish Society Mechanical Engineers and Technicians, 2005. s. 561-566. ISBN 83-87982-41-5

VEPŘEK, J. – NEVRLÝ, J. Determining Grease Dose in Progressive Lubricant Distributor. In *Proceedings of 9th International Conference Mechanical Engineering 2005 (Strojné inžinierstvo 2005), held at the Fakulty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, November 16th, 2005. SI 2005*. V. Geleta (eds.). Bratislava: Vydavateľstvo STU – Publishing House of the Slovak University of Technology in Bratislava, 2005. s. 141. ISBN 80-227-2314-2

11 ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno, příjmení a titul:	Ing. Jiří Vepřek, Stonava 779, STONAVA 735 34
Datum narození:	13. října 1979 (Třinec)
Telefon a email:	+420/607 687 243, jiri.veprek@seznam.cz
Rodinný stav:	svobodný

Praxe

11/2006-dosud	**Vývojový pracovník**, OCHI Inženýring, spol. s r.o. OSTRAVA, průmyslové zakázky, projekty divadelní techniky a granty

Vzdělání

09/2003-dosud	**Doktorské studium** VUT Brno/FSI, Ústav konstruování, Energetický ústav, Obor: Konstrukční a procesní inženýrství, Dizertační práce: *Optimalizace průtokových poměrů v mazacích systémech s progresivními rozdělovači pomocí genetických algoritmů*, státní zkouška: 26. 6. 2007
09/1998 – 06/2003	**Magisterské studium** VUT Brno/FSI, Energetický ústav, Odbor fluidního inženýrství V. K., Obor: Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení, Diplomová práce: *Návrh Stribeckových ploch u přímočarých pneumotorů*, státní zkouška: 11. 6. 2003
09/1998-06/2003	**Středoškolské vzdělání** SPŠ Karviná, maturita: 5. 6. 1998

Školení a certifikace

11/2007	Základy měření hluku, TU Liberec
02/2010	Základy měření vibrací, Spectris Praha, spol. s r.o.

Jazykové znalosti

Němčina	velmi dobré znalosti slovem i písmem, všeobecná a technická němčina, Zertifikat Deutsch (B1)
Angličtina	dobré znalosti slovem i písmem, všeobecná angličtina

Znalosti PC	Windows XP/Vista, MS Office 2007, Autodesk Inventor 2010 Professional, AutoCAD 2007, Matlab/Simulink, Dynast, Netbeans 6.5 (Java), ScopeWin
Ostatní	řidičský průkaz skupiny B

12 ABSTRACT

This doctoral thesis presents the results of the development of two software programs for the design of progressive distributors and progressive lubrication systems. One of these programs implements a genetic algorithm and the other, which is used to design progressive lubrication systems, implements a parallel genetic algorithm of the island model. The program for the design of progressive distributors was implemented in Java using the NetBeans development environment and the other program was created in Matlab. The thesis further focuses on analytical and computational solutions of the flow of compressible greases seen as viscoplastic fluids. Equations for the numerical solution of the non-steady flow of compressible viscoplastic Bingham fluids were derived and solved by the Lax-Wendroff method in Matlab. As several constants had to be set in the equations, experiments were conducted with the ecological grease Plantogel 2S in the laboratory of the Kaplan Department of Hydraulic Machines, mainly to determine the sound velocity in this grease. The sound velocity was calculated based on the experimental results by applying Fourier transformation and the transition matrix method. In addition to this, the rheological measurements of greases were used. As seen from the results, the ecological greases are actually thixotropic viscoplastic fluids with a significant elastic element. Since a Newton fluid was assumed when calculating the sound velocity, the possibilities of using the transition matrix method for viscoplastic fluids were then considered. No analytical solution of the flow of viscoplastic fluids in a frequency spectrum has been published so far. Because it emerged that greases had a significant elastic stress factor, the problem of the non-steady flow of elastic-viscoplastic fluids was solved numerically between two infinite parallel plates by applying the finite difference method (FDM). The computation was done in Matlab. This doctoral thesis makes a contribution to solving problems related to the design of progressive distributors and progressive lubrication systems used to distribute compressible greases. Considering the complex approach to this field and the achieved results, the thesis also represents a significant contribution to design work.