

# Optimalizace geometrie spirálové vytlačovací hlavy

Bc. Michal Hrdý

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Hrdý**  
Osobní číslo: **A16148**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Informační technologie**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Optimalizace geometrie spirálové vytlačovací hlavy**  
Téma anglicky: **The Optimisation of Spiral Die Geometry**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Definujte hodnotící funkci a nastavitelné parametry modelu vytlačovací hlavy.
3. Vizualizujte odezvu modelu na změnu parametrů.
4. Proveďte komparativní analýzu vybraných optimalizačních metod.
5. Na základě provedené analýzy navrhněte vhodnou optimalizační metodu.
6. Otestujte navrženou metodu na testovacích projektech.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. ZELINKA, Ivan. Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace. 1. vyd. Praha: BEN, 2009, 534 s. ISBN 978-80-7300-218-3.
2. ZELINKA, Ivan, Zuzana OPLATKOVÁ a Roman ŠENKEŘÍK. Aplikace umělé inteligence. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 151 s. ISBN 978-80-7318-898-6.
3. TVRDÍK, Josef. Učební texty ostravské univerzity: Evoluční algoritmy. Ostrava: Ostravská univerzita, 2004.
4. HEROUT, Pavel. Učebnice jazyka C. Praha: Kopp, 2004, 271 s. ISBN 8072322206.
5. Handbook of Optimization: From Classical to Modern Approach. 2013. vyd. Editor Ivan Zelinka, Václav Snášel, Ajith Abraham. Berlin: Springer, 2013, xii, 1100 s. Intelligent systems reference library, 38. ISBN 978-3-642-30503-0.
6. MAŘÍK, V., ŠTĚPÁNKOVÁ, O., LAŽANSKÝ, J.: Umělá inteligence, Academia, 1993, ISBN 80-200-0496-3.
7. ZELINKA, Ivan. Umělá inteligence v problémech globální optimalizace. BEN, 2002, 190 s. ISBN 80-7300-069-5.
8. MAŘÍK, V., ŠTĚPÁNKOVÁ, O., LAŽANSKÝ, J.: Umělá inteligence 4., Academia, 2003, ISBN 80-200-1044-0.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Michal Pluháček, PhD.**

Ústav informatiky a umělé inteligence

Datum zadání diplomové práce:

**1. prosince 2017**

Termín odevzdání diplomové práce:

**16. května 2018**

Ve Zlíně dne 11. prosince 2017

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
děkan



prof. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.  
garant oboru

### **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Cílem práce je navržení vhodné metody, pro nalezení optimálních geometrických parametrů spirálové vytlačovací hlavy pro vytlačování plastů. Jako matematický model je použit solver z modulu Spiral Die, který je součástí simulačního software Virtual Extrusion Laboratory (VEL) společnosti Compuplast International a.s. Práce se zabývá volbou optimalizovatelných parametrů a sestavení cílové funkce. Dále je provedena vizualizace odezvy modelu hlavy na změnu několika vstupních parametrů, výběr několika metod pro nalezení optimálních hodnot parametrů a otestování zvolených metod pomocí volně dostupných nástrojů. Nejlepší z testovaných algoritmů pak je upraven a otestován na několika testovacích projektech. Výsledný algoritmus se po dokončení DP stane součástí Virtual Extrusion Laboratory buď jako samostatný optimalizační modul, nebo jako součást Spiral Die modulu a bude sloužit jako nástroj k návrhu spirálových vytlačovacích hlav případně pro troubleshooting hlav existujících.

Klíčová slova: Spirálová vytlačovací hlava, Heuristika, Optimalizace, Evoluční algoritmy

## **ABSTRACT**

The aim of the thesis is to design a suitable method for finding optimal geometrical parameters of the spiral extrusion dies for extrusion of plastics. As a mathematical model, a solver from the Spiral Die module is used, which is part of Virtual Extrusion Laboratory (VEL) simulation software from Compuplast International a.s. The thesis deals with choosing optimizable parameters and assembling the target function. In addition, a visualization of models response to a change of several input parameters, a selection of several methods for finding optimal parameter values and testing of selected methods using freely available tools is performed. The best of the tested algorithms is then modified and tested on several test projects. The resulting algorithm will become part of the Virtual Extrusion Laboratory as a standalone optimization module or as part of the Spiral Die Module and will serve as a tool for designing spiral extrusion heads or for troubleshooting existing ones.

Keywords: Spiral Mandrel Die, Heuristics, Optimization, Evolutionary Algorithms

Mé poděkování patří především vedoucímu práce Ing. Michalu Pluháčkovi, Ph.D. za cenné rady a trpělivost při tvorbě této práce. Dále bych chtěl zmínit pana Ing. Ilju Paseku, CSc. bez jehož pomoci by tato práce také nevznikla.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ</b> .....	<b>10</b>
1.1 VYTLAČOVÁNÍ .....	10
1.2 SPIRÁLOVÉ VYTLAČOVACÍ HLAVY .....	11
<b>2 MODEL VYTLAČOVACÍ HLAVY</b> .....	<b>15</b>
<b>3 OPTIMALIZACE</b> .....	<b>16</b>
<b>4 EVOLUČNÍ METODY OPTIMALIZACE</b> .....	<b>17</b>
4.1 GENETICKÝ ALGORITMUS .....	18
4.2 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION .....	20
4.3 DIFERENCIÁLNÍ EVOLUCE.....	21
<b>5 FRAMEWORK EVA2</b> .....	<b>24</b>
<b>6 WOLFRAM MATHEMATICA</b> .....	<b>25</b>
<b>7 JAZYK C++</b> .....	<b>26</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>27</b>
<b>8 ÚČELOVÁ FUNKCE</b> .....	<b>28</b>
8.1 TLAKOVÁ ZTRÁTA.....	28
8.2 VÝSTUPNÍ OBJEMOVÝ TOK .....	28
8.3 RYCHLOST UVOLŇOVÁNÍ MATERIÁLU Z KANÁLU .....	29
8.4 SMYKOVÉ NAPĚTÍ.....	29
8.5 SESTAVENÍ ÚČELOVÉ FUNKCE .....	29
<b>9 NASTAVITELNÉ PARAMETRY</b> .....	<b>31</b>
9.1 POČÁTEČNÍ MEZERA MEZI TĚLEM A JÁDREM .....	31
9.2 MEZERA NA VÝSTUPU HLAVY .....	32
9.3 POLOMĚR KANÁLU .....	32
9.4 POČÁTEČNÍ HLOUBKA KANÁLU .....	33
<b>10 VIZUALIZACE ODEZVY MODELU HLAVY</b> .....	<b>34</b>
10.1 VIZUALIZACE VLIVU ZMĚNY POČÁTEČNÍ MEZERY .....	35
10.2 VIZUALIZACE ZMĚNY VÝSTUPNÍ MEZERY .....	36
10.3 VIZUALIZACE ZMĚNY HLOUBKY NA POČÁTKU SPIRÁLOVÉHO KANÁLU.....	37
10.4 VIZUALIZACE ZMĚNY POLOMĚRU SPIRÁLOVÉHO KANÁLU .....	38
<b>11 SROVNÁNÍ OPTIMALIZAČNÍCH ALGORITMŮ</b> .....	<b>39</b>
11.1 NASTAVENÍ POUŽITÝCH ALGORITMŮ.....	39
11.2 VÝSLEDKY TESTŮ.....	39
<b>12 NÁVRH ÚPRAV VYBRANÉHO OPTIMALIZAČNÍHO ALGORITMU</b> .....	<b>41</b>
<b>13 TEST ALGORITMU</b> .....	<b>43</b>
<b>14 OTESTOVÁNÍ ALGORITMU NA EXISTUJÍCÍCH PROJEKTECH</b> .....	<b>48</b>

14.1	VYTLAČOVACÍ HLAVA Č. 1 .....	48
14.2	VYTLAČOVACÍ HLAVA Č. 2 .....	49
14.3	VYTLAČOVACÍ HLAVA Č. 3 .....	50
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>53</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	.....	<b>54</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	.....	<b>56</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	.....	<b>57</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	.....	<b>59</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	.....	<b>60</b>



## ÚVOD

Motivací pro tuto práci se stala absence optimalizačního nástroje pro vytlačovací hlavy v softwarovém balíku Virtual Extrusion Laboratory společnosti Compuplast International. Tato CAE sada software obsahuje nástroje pro simulaci, optimalizaci a odstraňování problémů vznikajících při různých fázích vytlačování plastů.

Práce si dává za úkol návrh metody vhodné pro automatizovanou optimalizaci základních geometrických parametrů spirálových vytlačovacích hlav s využitím Spiral Die modulu, který je součástí VEL jako matematického modelu. Vzhledem k neexistenci popisu použitých výpočetních metod nelze činit žádné předpoklady o chování modelu, a proto budou v práci využity heuristické evoluční optimalizační techniky vhodné pro řešení black box problémů.

Jedním z hlavních problémů, které je před aplikací konkrétních algoritmů třeba řešit je výběr vhodných geometrických parametrů vytlačovací hlavy které budou univerzální napříč všemi geometriemi. Pomocí změny těchto parametrů se pak testované algoritmy budou snažit dosáhnout optimálního nastavení vytlačovací hlavy. K posouzení vhodnosti řešení bude sestavena funkce, jejímž vstupem budou výsledky fyzikálních simulací modulu Spiral Die a výstupem pak kvalita nastavených parametrů neboli kvalita řešení. Na takto sestavené funkci bude otestováno několik základních evolučních algoritmů. Jejich výkony budou posouzeny a vybraný kandidát pak bude dále modifikován s cílem dosáhnout lepších výsledků. Výsledný algoritmus pak bude implementován v C++ a otestován stejným způsobem jako předchozí algoritmy. V závěru práce bude algoritmus otestován na existujících geometriích.

Pro vytvoření představy o řešeném problému bude provedena vizualizace odezvy modelu na změnu nastavitelných parametrů za pomoci softwaru Wolfram Mathematica.

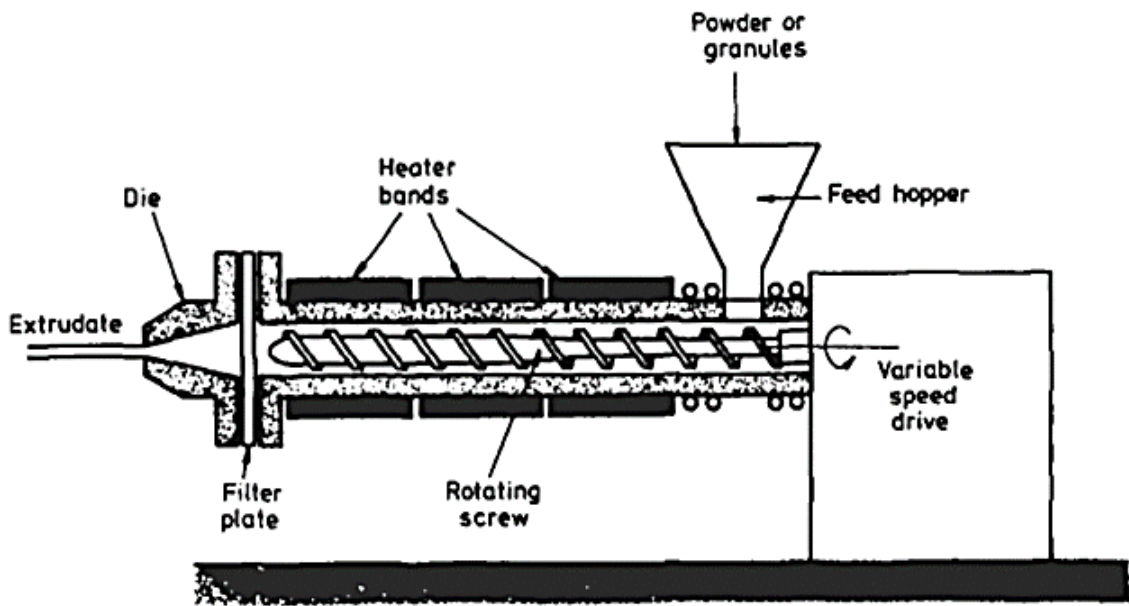
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ

Jednou z vynikajících vlastností plastů je lehkost s jakou mohou být zpracovány. V některých případech jsou vyrobeny polotovary jako listy nebo pruty a ty postupně opracovány do požadovaného tvaru za použití běžných metod jako jsou svařování nebo obrábění. Ve většině případů je však výsledný produkt, který může mít celkově komplexní tvar, vyroben v jednom kroku. Jednotlivé fáze zpracování, jmenovitě tavení, tvarování a chlazení, mohou být kontinuální (např. výroba trubek vytlačováním) nebo opakované cykly úkonů (např. výroba krytu telefonu metodou vstřikování), ale ve většině případů jsou automatizovatelné a proto jsou vhodné pro masovou výrobu. Existuje velká řada zpracovatelských metod aplikovatelných pro plasty. Ve většině případů je volba metody závislá na tvaru výrobku, a jestli je použitý materiál termoplastický nebo termosetový. Špatně koncipovaný tvar nebo detail návrhu pak může omezit výběr formovacích metod. V této kapitole je popsána metoda zpracování plastů pomocí vytlačování. Dále jsou pak popsány spirálové vytlačovací hlavy, na které je tato diplomová práce zaměřena. [1]

### 1.1 Vytlačování

Jednou z nejběžnějších metod zpracování plastů je vytlačování za použití šneku v umístěného ve válci, jak je ilustrováno na Obr. 1. Plast, většinou ve formě granulí nebo prášku, je přiváděn pomocí násypky ke šneku. Materiál je potom unášen potrubím, kde je ohříván teplem vedeným od ohřivačů na vnějších stěnách válce a smýkán důsledkem jeho pohybu podél šneku. Hloubka kanálu šroubovice šneku se směrem k výstupu zmenšuje a dochází ke stlačování materiálu. Na konci vytlačovacího stroje tavenina prochází vytlačovací hlavou, která jí dodá konečný tvar. Při použití různých vytlačovacích hlav pak jeden vytlačovací stroj může být použit jako základ pro několik různých metod zpracování plastu. [1]



Obr. 1. Schematické znázornění vytlačovacího stroje s jedním šnekem [1]

## 1.2 Spirálové vytlačovací hlavy

Nejpoužívanějším typem vytlačovací hlavy při tzv. vyfukování fólií jsou spirálové vytlačovací hlavy. Při aplikaci této technologie je materiál rozdělen do několika spirálových kanálů, jejichž hloubka se zmenšuje ve směru toku materiálu. Spirálový typ vytlačovací hlavy je populární hlavně díky nízkým tlakovým požadavkům a její dobré charakteristice distribuce taveniny. Spirálové hlavy jsou použitelné pro velké množství materiálů a při široké škále operačních podmínek.

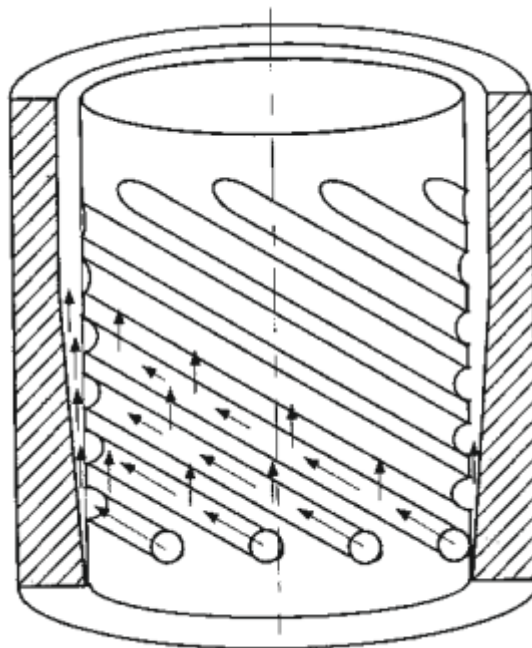


Obr. 2. Jádro spirálové vytlačovací hlavy

Distribuční charakteristiky konvenčních crosshead hlav mohou být pro použití při výrobě fólií, kde se vyžaduje malá tloušťka výrobku (typicky mezi 0,005 mm a 0,25 mm) nedostatečné. Spirálové hlavy mohou dosáhnout lepší distribuce toku a z většiny eliminovat nerovnosti vznikající stékáním více proudů materiálu. Výsledkem je velká rozšířenost těchto hlav při produkci fólií.

Zjednodušená ilustrace spirálové vytlačovací hlavy je zobrazena na Obr. 3.

Roztavený polymer se rozvede do několika přívodních portů. Každý tento port přivádí polymer do spirálového výřezu jádra vytlačovací hlavy. Průřez této spirály se zmenšuje se vzdáleností od počátku, zatímco mezera mezi jádrem a tělem hlavy se zvětšuje směrem k výstupu hlavy. Vícenásobnost tokových kanálů zajišťuje mísení nebo vrstvení polymerové taveniny z různých přívodních portů a napomáhá tak dobré distribuci materiálu vystupujícího z hlavy. [2][3]

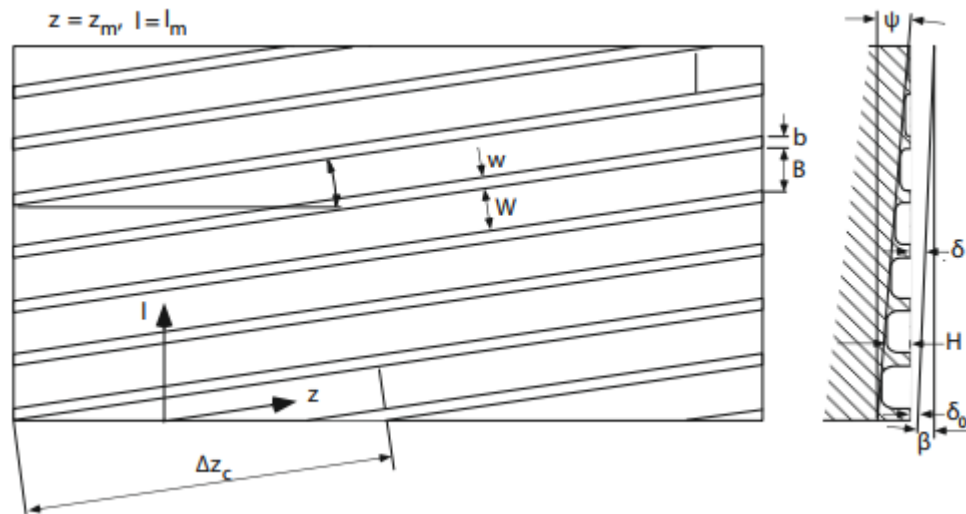


Obr. 3. Řez tělem vytlačovací hlavy [3]

Rauwendaal [3] popisuje tok materiálu v kanálu spirály dle Obr. 4 jako:

$$\dot{V} = \frac{F_p W H^2}{2(s + 2)} \left[ \frac{H g_z}{2m} \right]^s \quad (1)$$

Kde  $g_z$  je spirálovitý spádový gradient tlaku,  $F_p$  tvarový faktor spirálového kanálu a  $s$  je obrácený index mocninového zákona ( $s = 1/n$ ) který vyjadřuje závislost viskozity na smykové rychlosti.  $W$  a  $H$  pak vyjadřují šířku a hloubku kanálu.



Obr. 4. Spirála vytlačovací hlavy rozprostřená v rovině [3]

Pro malé hodnoty poměru výšky a šířky ( $H/W < 0.5$ ) se faktor tvaru může nahradit konstantou  $F_p = 0,45$ . Tok při uvolňování materiálu z kanálu se pak dá popsat rovnicí:

$$\dot{V}'_l = \frac{\delta^2}{2(s+2)} \left[ \frac{\delta g_l}{2m} \right]^s \quad (2)$$

Kde  $g_l$  je axiální tlakový gradient a  $\delta$  je velikost mezery nad kanálem. Spádový tlakový gradient může být vztažen k axiálnímu tlakovému gradientu pomocí:

$$g_z = g_l \sin \varphi \quad (3)$$

Během první  $\Delta z_c$  spirálové vzdálenosti není tok v kanálu ovlivňován uvolňováním materiálu z kanálu pod ním. Pro tuto část hlavy platí následující rovnováha hmoty, za předpokladu že se hustota taveniny nemění:

$$\dot{V}_z(z + \Delta z) = \dot{V}_z(z) - \dot{V}_z(z) \Delta z \cos \varphi \quad (4)$$

Za prvním úsekem vzdálenosti  $\Delta z_c$  je tok ve spirálovém kanálu ovlivňován tokem z kanálu pod ním. Zde platí rovnováha:

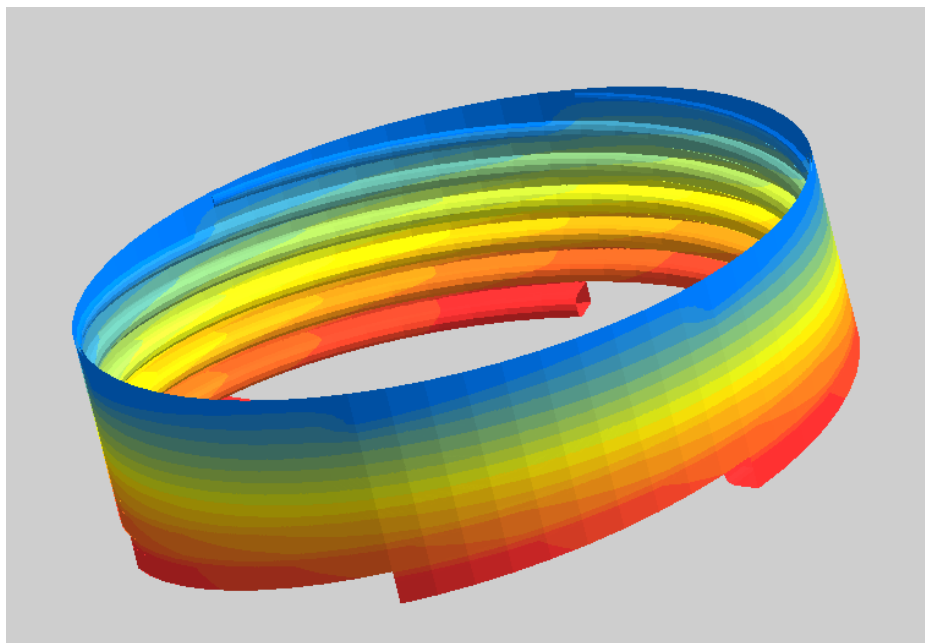
$$\dot{V}_z(z + \Delta z) = \dot{V}_z(z) - \dot{V}_z(z - \Delta z) \Delta z \cos \varphi - \dot{V}_z(z) \Delta z \cos \varphi \quad (5)$$

S pomocí těchto rovnic lze vypočítat distribuci toku. Tento výpočet se provádí v krocích. Délka kroku musí být dostatečně malá, aby poměr  $V(z+\Delta z)/V(z)$  byl řádově jednotkový.

## 2 MODEL VYTLAČOVACÍ HLAVY

Jako matematický model vytlačovací hlavy je použit solver modulu Spiral Die ze sady nástrojů Virtual Extrusion Laboratory společnosti Compuplast International a.s.

Použitý software umožňuje výpočty fyzikálních vlastností materiálu a jeho toku v hlavě na základě parametrického popisu geometrie a použitého materiálu. Protože použitý software byl závislý na grafickém rozhraní, které neumožňovalo automatizaci výpočtů, byla pro potřeby diplomové práce vytvořena dvojice programů, která umožnila vytvořit vizualizaci odezvy modelu na změnu parametrů geometrie a také umožnila propojení solveru s externí knihovnou algoritmů pro potřeby testování. Jak samotný solver tak obslužné programy jsou implementovány v jazyce C++.



Obr. 5. Vizualizace změny tlaku ve vytlačovací hlavě pomocí modulu Spiral Die



### 3 OPTIMALIZACE

Optimalizace je proces hledání optimálních parametrů systému. Parametry se označují jako cílové proměnné. Každý řešený problém má množinu  $S$  řešení, které nazýváme prostor řešení nebo prohledávaný prostor. Typickým příkladem prostoru řešení je množina  $\mathbb{R}$  spojitých hodnot. Ve většině případů je hodnot, které je třeba optimalizovat více, než jedna což vede na  $N$ -rozměrný problém. Pro spojitě problémy to znamená, že se prohledává prostor  $\mathbb{R}^N$ . Jedním z nejznámějších optimalizačních problémů je problém obchodního cestujícího. Obchodní cestující má za úkol najít nejkratší cestu množinou měst a vrátit se do své výchozí lokace. V tomto případě se řešení skládá ze seznamu měst v určitém pořadí. Proveditelné řešení pak musí obsahovat všechna města.

Optimálnost může být definována pouze s ohledem na určitou kvalitu řešení. Kvalitu řešení měříme s pomocí fitness funkce  $f$  vyjadřující vhodnost daného řešení. Optimální řešení  $\mathbf{x}^*$  má lepší hodnotu (fitness)  $f(\mathbf{x}^*)$  než všechna ostatní řešení  $\mathbf{x}$  z prostoru řešení  $\mathbb{R}^N$ . Znamená to že pro optimální řešení  $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^N$  platí  $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x})$  pro všechna  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ . Tento popis platí pro single-objective optimalizaci kterou se tato práce zabývá. Takto definovaný popis odpovídá minimalizačním problémům. Maximalizační problémy mohou být jednoduše převedeny na minimalizační pomocí inverze cílové funkce

$$f_{min}(x) = -f_{max}(x). \quad (6)$$

Řešení  $\mathbf{x}^*$  s lepší hodnotou fitness  $f(\mathbf{x}^*) < f(\mathbf{x})$  než řešení v jeho okolí  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$  pro které platí  $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| < \kappa$  kde  $\kappa > 0$  se nazývá lokálním optimelem.

Pro neomezený prostor řešení mohou být podmínky pro optimum formulovány také pomocí první a druhé parciální derivace. Nutná podmínka, aby řešení  $\mathbf{x}^*$  mohlo být prohlášeno za optimum je, že v tomto bodě musí být gradient  $\nabla f(\mathbf{x}^*) = 0$ . Aby se vyloučily tzv. sedlové body, druhá derivace v  $\mathbf{x}^*$  musí změnit znaménko. Tato podmínka se dá formulovat pomocí Hessiany matice  $\mathbf{H}$ , která osahuje druhé parciální derivace

$$\mathbf{H}(f) = \nabla^2 f = \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right]_{i,j=1,\dots,N} \quad (7)$$

za podmínky že je  $\mathbf{H}$  pozitivně definitní, tzn.  $\mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x}$  je pozitivní pro všechny nenulové sloupce  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ . V mnoha matematicky zadaných případech se řešení dá vypočítat pomocí výše zmíněných rovnic. Tato práce se však zabývá problémem, kde  $\mathbf{H}$  není známo.[8]

## 4 EVOLUČNÍ METODY OPTIMALIZACE

V této kapitole jsou popsány heuristické evoluční optimalizační metody, na jejichž principech fungují algoritmy použité v této práci. Často není o řešené úloze známo mnoho informací s výjimkou těch, které se dají získat vyhodnocením funkce. Derivace ani omezení prostoru řešení nejsou známy. V nejhorsích případech nejsou známy ani charakteristiky fitness funkce jako je unimodálnost nebo multimodálnost. Takové případy si žádají aplikaci optimalizačních strategií často nazývaných metody přímého vyhledávání. Evoluční algoritmy, které napodobují biologické pochody evoluce a zahrnují stochastické komponenty k prohledávání prostoru řešení se vyvinuly v silné optimalizační metody. Evoluční metody, které jsou schopny efektivně hledat ve velkém množství scénářů a učit se z vypořizovaných vzorů při využití v dataminingu nacházejí široké uplatnění v mnoha rozličných disciplínách jako je civilní a elektrotechnické inženýrství. Tyto metody byly ovlivněny řadou disciplín: robotika, statistika, počítačové vědy, inženýrství a kognitivní vědy. To může být také důvodem, proč se během posledních desetiletí vyvinula velká řada technik. Tento vývoj zahrnuje aplikaci optimalizace a učících technik v procesu návrhu a vytváření prototypů. Simulace umožňují studovat charakteristiky navrženého prototypu ještě před tím, než je vyroben výsledný produkt. Takový proces vývoje pak dovoluje provádět optimalizaci prototypu nebo jeho částí zcela na základě počítačových výpočtů což vede ke značnému zrychlení a úsporám financí i výrobního materiálu. Učení a optimalizace jsou silně provázány. V optimalizaci se snažíme najít optimální parametry funkce nebo systému s ohledem na definovaný cíl. Úkolem strojového učení je pak nalezení optimálního funkčního modelu, který umožňuje popis vztahů mezi pozorováními. Pattern recognition (rozpoznávání vzorů) a strojové učení v sobě také zahrnují řešení optimalizačních problémů.

Evoluční optimalizace je třída black box optimalizačních algoritmů. Evoluční algoritmy jsou založeny na evolučních operátorech, které modelují specifické procesy daného problému přirozenou evolucí. Nejdůležitějšími operátory jsou:

1. křížení
2. mutace
3. výběr

Základem většiny evolučních metod je množina možných řešení (populace). Křížením se kombinují charakteristiky dvou nebo více řešení. Mutace pak přidává náhodné změny a snaží

se vybalancovat exploraci (průzkum prostoru ve snaze najít body optima) a exploitaci (prohledávání okolí již nalezených bodů). Výběrem se pak iterativně volí nejlepší postupující řešení. Tyto operace se pak opakují dle Obr. 6. do splnění ukončovacích podmínek. [8]



Obr. 6. Hlavní generační smyčka evolučních algoritmů [6]

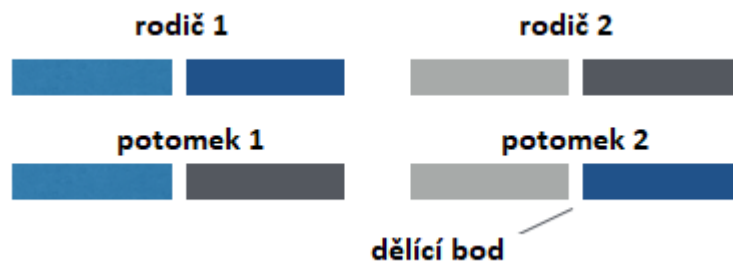
#### 4.1 Genetický Algoritmus

Genetické algoritmy jsou biologicky inspirované evoluční algoritmy pro optimalizaci. Evoluce byla poprvé popsána Charlesem Darwinem v jeho nejznámější práci „On the Origin of Species“. Evoluce popisuje vývoj biologických organismů pomocí výběru nejlepšího partnera a přežitím nejsilnějších jedinců.

Klasický genetický algoritmus je založen na setu možných řešení problému který chceme řešit. Řešením se pak rozumí potencionální optimum řešeného problému. Jeho reprezentace pak ovlivňuje volbu použitelných genetických operátorů. Reprezentace řešení obvykle představuje seznam hodnot a je tedy obecně sadou symbolů. Pokud jsou tyto symboly ze spojitého prostoru, říká se jim vektory. Pokud jsou reprezentovány bity, říká se jim binární řetězce. Genetické operátory pak slouží k vytváření nových řešení v dané reprezentaci a dovolují tak prohledávání prostoru řešení. Kód pro zápis řešení evolučního procesu se pak nazývá genotyp nebo chromozom.

Při startu algoritmu se inicializuje sada řešení, která se označuje jako populace. U této inicializace se doporučuje, aby náhodně pokryla celý prostor řešení nebo aby byla provedena pomocí expertních znalostí. Pro binární řetězec je například inicializace provedena náhodným nastavením nul a jedniček v řetězci. Hlavní generační smyčka genetického algoritmu pak generuje nové řešení pomocí křížení a mutace dokud populace není kompletní.

Křížení je operátor, který dovoluje kombinovat genetickou informaci dvou nebo více řešení. V přírodě má většina druhů dva rodiče. U genetických algoritmů se dá křížení rozšířit na více než dva rodiče. Nejznámějším z těchto operátorů pro bitové řetězce je  $n$ -bodové křížení. Tento způsob rozděluje dvě řešení na  $n$  pozicích a takto vzniklé části pak střídavě složí v nová řešení Obr. 7.



Obr. 7. Jednobodové křížení [6]

Mutace je druhou operací genetických algoritmů. Mutační operátory mění řešení pomocí náhodných změn. Velikost této změny je ovlivněna mírou mutace. Ve spojitých prostorech je míra mutace nazývána krokem.

Po vygenerování jsou řešení ohodnocena pomocí fitness funkce a následuje výběr jedinců pro následující generaci. Výběr umožňuje konvergenci k optimálním řešením. Nejlepší jedinci jsou vybráni a stávají se rodiči nové generace, tímto je dosaženo posunu směrem k optimálním řešením. Výběr probíhá na základě hodnoty fitness funkce pro dané řešení. Např. při minimalizaci jsou vybírány preferenčně řešení s nižšími hodnotami fitness a naopak při maximalizaci jsou preferovány vyšší hodnoty. Strategie výběru pak mohou vybírat nové rodiče dvěma způsoby. Buď je výběr prováděn jen z potomků, nebo je do výběru zahrnuta i aktuální množina rodičů. Vyřazení rodičů z výběru může zlepšit schopnost algoritmu uniknout z lokálního extrému.

Ukončení hlavní optimalizační smyčky je pak řízeno podmínkou nejčastěji udávanou počtem vyhodnocení fitness funkce nebo počtem generací. Dalším ukončovacím kritériem může být konvergence algoritmu. Pokud nedochází k signifikantnímu zlepšování řešení, může být běh algoritmu také ukončen.

## 4.2 Particle Swarm Optimization

Particle swarm (roj částic) [13] [14], je populační stochastický algoritmus pro optimalizaci, který je založen na sociálně-psychologických principech. Na rozdíl od jiných evolučních algoritmů, PSO nepoužívá metody výběru jedinců. Typicky všichni jedinci populace přežívají po celý běh algoritmu až do jeho ukončení. Jejich interakcí pak dochází k iterativnímu zlepšování řešení daného problému v čase.

Jedinec je číselný vektor o  $D$  dimenzích, který je většinou náhodně inicializován v prohledávaném prostoru a představuje bod ve vícerozměrném kartézském souřadném systému. Protože jedinec se pohybuje prostorem a prozkoumává nové hodnoty nastavitelných parametrů lze jej popsat jako částici. Tím že jich tuto činnost vykonává více zároveň (obvykle  $10 < N < 100$ ) a proto, že mají tendenci se shlukovat v oblastech optimálních hodnot prohledávaného prostoru, se jim říká roj částic.

Kromě pohybu v (nejčastěji) euklidovském prostoru problému jsou částice také propojeny do topologické sítě, která definuje jejich komunikační vzor. Každá částice má přiřazen určitý počet sousedů, se kterými je obousměrně propojena.

Nejčastější typ implementace definuje chování částice pomocí dvou rovnic. První upravuje rychlost nebo krok dané částice a druhá pohybuje částicí přičtením rychlosti k její předchozí pozici.

V každé dimenzi  $d$  se provádí:

$$v_{id}^{(t+1)} \leftarrow \alpha v_{id}^{(t)} + U(0, \beta)(p_{id} - x_{id}^{(t)}) + U(0, \beta)(p_{gd} - x_{id}^{(t)}) \quad (8)$$

$$x_{id}^{(t+1)} \leftarrow x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (9)$$

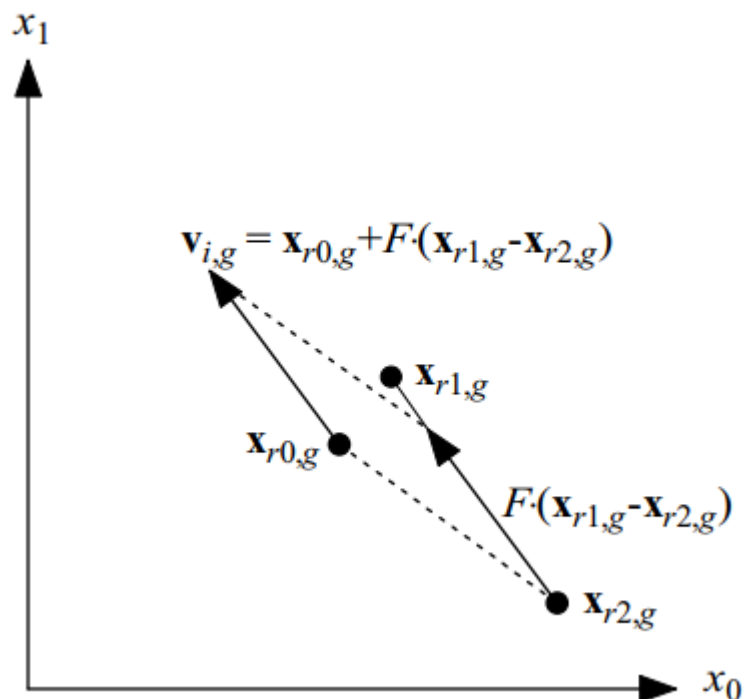
kde  $i$  je index dané částice,  $d$  je dimenze,  $x_i$  je pozice částice,  $v_i$  je rychlost,  $p_i$  je nejlepší pozice nalezená částicí  $i$ ,  $g$  je její nejlepší soused,  $\alpha$  a  $\beta$  jsou konstanty,  $U(0, \beta)$  je generátor náhodných čísel s rovnoměrným rozdělením.

Program vyhodnotí vektor parametrů částice  $i$  pomocí funkce  $f(x)$  a porovná výsledek s nejlepším výsledkem doposud nalezeným částicí  $i$ , kterému se říká  $pbest_i$ . Pokud je aktuální výsledek zatím nejlepší nalezený, pak je vektor  $p_i$  aktualizován na aktuální hodnotu  $x_i$  a předchozí nejlepší hodnota  $pbest_i$  je nahrazena novou hodnotou.

Při běhu systému každá částice krouží kolem oblasti, jejíž centrum leží v těžišti předchozích nalezených  $p_i$  a  $p_g$ . Jak jsou tyto hodnoty aktualizovány, posouvá se trajektorie částice do nových oblastí prohledávaného prostoru, částice se začínají shlukovat kolem optima a získávají tak lepší funkční hodnoty. [4]

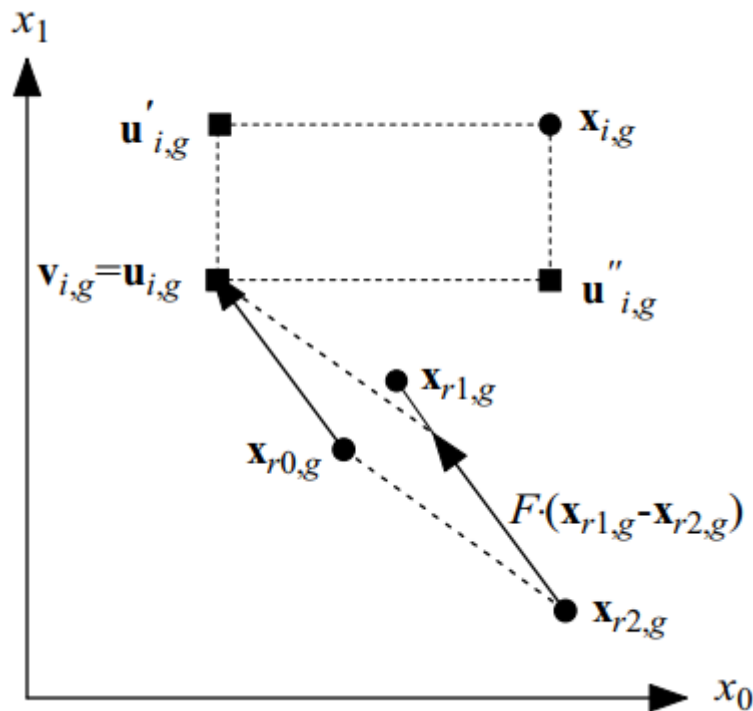
### 4.3 Diferenciální evoluce

Jako většina evolučních algoritmů je DE populační algoritmus, který řeší problém počátečních bodů výpočtem hodnot cílové funkce v několika náhodně vybraných startovních bodech. Přednastavené hranice parametrů definují prostor, v němž se zvolí  $Np$  vektorů počáteční populace. Každý tento vektor je pak indexován číslem od 0 do  $Np-1$ . Jako jiné populační metody i DE generuje nové body, které jsou perturbací existujících bodů. Tato perturbace je prováděna váženým rozdílem dvou náhodně vybraných vektorů z aktuální generace proto název diferenciální evoluce.



Obr. 8. Ilustrace výpočtu mutačního vektoru  $v_{i,g}$  [5]

Vygenerování zkušebního vektoru DE provádí tak že přičítá vážený rozdíl náhodných vektorů k třetímu náhodnému vektoru populace (Obr. 8) a prvky takto vzniklého mutačního vektoru  $v_{i,g}$  náhodně vyměňuje za korespondující prvky aktivního vektoru (Obr. 9). Pravděpodobnost záměny je dána konstantou  $Cr \in [0,1]$  kde při hodnotě 0 k záměně nedochází a při hodnotě 1 k záměně dochází vždy. Váha rozdílu je značena  $F$ .



Obr. 9. Ilustrace výpočtu zkušebního vektoru a jeho variant  $u_{ig} - u_{ig}''$  [5]

Ve výběrové fázi zkušební vektor soupeří s daným členem populace. Vektor, pro který je hodnota cílové funkce menší, je pak uložen a stává se členem nové generace. Popsaná procedura se pak opakuje pro každý vektor stávající generace, dokud všech  $Np$  vektorů nebylo porovnáno s vygenerovaným zkušebním vektorem. Po porovnání posledního zkušebního vektoru se uložené vektory stanou rodiči pro další generaci evolučního cyklu. [5]

Kromě zde popsané metody (rand/1) výpočtu mutačního vektoru existuje ještě několik používaných variant.

rand/1:

$$v_{i,g} = x_{r0,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (10)$$

rand/2:

$$v_{i,g} = x_{r0,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) + F(x_{r3,g} - x_{r4,g}) \quad (11)$$

best/1:

$$v_{i,g} = x_{best,g} + F(x_{r0,g} - x_{r1,g}) \quad (12)$$

best/2:

$$v_{i,g} = x_{best,g} + F(x_{r0,g} - x_{r1,g}) + F(x_{r2,g} - x_{r3,g}) \quad (13)$$

current-to-best/1:

$$v_{i,g} = x_{i,g} + F(x_{best,g} - x_{r0,g}) + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (14)$$

current-to-pbest/1:

$$v_{i,g} = x_{i,g} + F(x_{p,g} - x_{i,g}) + F(x_{r0,g} - x_{r1,g}) \quad (15)$$

V generaci  $G$  je vektor o indexu  $i$  označen jako  $x_{i,g}$ . Hodnoty  $r1-r4$  jsou náhodná celá čísla rozdílných hodnot od 1 do  $Np$  lišící se od  $i$ .  $x_{best,g}$  je nejlepší jedinec z aktuální generace.



## 5 FRAMEWORK EVA2

EvA2 je heuristický optimalizační framework s důrazem na evoluční algoritmy implementovaný v Jave. Jedná se o vylepšenou verzi JavaEvA optimalizační knihovny která byla vyvinuta jako pokračovatel předcházejícího EvA software balíku. EvA2 integruje několik ne-derivačních převážně populačních optimalizačních metod, jako jsou evoluční strategie, genetické algoritmy, diferenciální evoluce a PSO stejně jako klasické techniky typu horolezecký algoritmus s více počátečními body nebo simulované žihání. Kromě single-objective problémů je frameworkem možno řešit i multimodální a multi-objective problémy. Program umožňuje také napojení na externí solver pro řešení problému pomocí volání exe souboru s předáním parametrů což umožňuje použití programů napsaných pro tuto diplomovou práci v C++.

Framework je distribuován v licenci GNU Lesser General Public License a jeho otevřený zdrojový kód umožňuje úpravu stávajících případně přidávání nových algoritmů. EvA2 byla vyvinuta na jihoněmecké univerzitě Tübingen a byla již využita při projektech firem jako je Daimler AG, BMW, The Bosch Group, Altana Pharma, INSILICO biotechnology a hte GmbH. [7]

## 6 WOLFRAM MATHEMATICA

Software Mathematica je v této práci využit k vizualizaci odezvy modelu vytlačovací hlavy na změnu geometrických parametrů a je také využit ke zpracování dat a tvorbě grafů pro testovací část práce.

Mathematica byla poprvé představena v roce 1988 a během let se stala důležitým softwarem ve velkém množství oborů. Je používán ve vědních oborech fyziky, biologie, sociologie a jiných. Mezi své uživatele počítá i nejpřednější světové vědce. V inženýrství se Mathematica stala standardním nástrojem jak pro vývoj, tak pro produkci, a nyní se mnoho nových světových produktů spoléhá v jejich návrhu na Mathematice. V prodejní sféře hraje Mathematica roli v rozvoji sofistikovaného finančního modelování stejně jako při plánování a analýze. Mathematica se také stala důležitým nástrojem v oblasti výpočetní techniky a vývoje softwaru. Její programovací jazyk je široce používán jako prostředí výzkumu, vývoje prototypů a rozhraní. [11]

## 7 JAZYK C++

Tento jazyk je využit k implementaci výsledného algoritmu s úpravami. Jazyk byl zvolen na základě faktu, že použitý model je rovněž implementován v C++ a bude tak možno výsledný algoritmus v budoucnu začlenit do existujícího kódu.

C ++ je univerzální programovací jazyk, který klade důraz na design a používání typově bohatých, nenáročných abstrakcí. S drobnými výjimkami je C++ nástavbou programovacího jazyka C. K výbavě, která je součástí C přidává C++ flexibilní a efektivní možnosti definování nových typů. Programátor může aplikaci rozdělit do lépe udržovatelných bloků s pomocí nástrojů pro definování nových typů, které jsou blízké konceptům aplikace. Tato technika konstrukce programů se často nazývá datová abstrakce. Objekty uživatelem definovaných typů obsahují informace o tomto typu. Takové objekty pak mohou být pohodlně a bezpečně v kontextech kde jejich typ nelze bezpečně určit při kompilaci. Programy užívající objekty takovýchto typů se často nazývají objektové. Při správném užití tyto techniky vedou ke kratšímu, lépe čitelnému a lépe udržovatelnému kódu. Klíčovým konceptem C++ jsou třídy. Třída je uživatelem definovaný typ. Třídy ukrývají data před nechtěnou manipulací, garantují inicializaci dat a konverzi uživatelem definovaných typů, dále poskytují dynamické typování, uživatelem řízenou správu paměti a mechanismy k přetěžování operátorů. C++ oproti C také poskytuje vylepšení, které se netýkají jen tříd, jako jsou symbolické konstanty, inline nahrazování funkcí a nastavení výchozích funkčních parametrů, přetěžování názvů funkcí a referenční typy. Je také zachována schopnost pracovat efektivně s fundamentálními objekty (bity, byty, slova, adresy atd.) což umožňuje efektivní implementaci uživatelských typů. Standardní knihovny jsou navrženy s ohledem na přenositelnost kódu. Většina C knihoven může být použita v C++ aplikaci.

Je zvláště vhodný pro aplikace s omezeným přístupem k prostředkům, jako například pro softwarové infrastruktury. Důraz na stabilitu také znamená, že kód, který odpovídá standardům, bude fungovat i pár desetiletí. [10]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 8 ÚČELOVÁ FUNKCE

Při návrhu vytlačovacích hlavy stejně jako kanálu pro tok materiálu, existuje několik kritérií pro posouzení kvality daného návrhu, kterým může být přiřazena různá priorita. Kvalita vytlačovaného produktu je primárně závislá na distribuci objemového toku  $Qv$  roztaveného materiálu na výstupu hlavy. Dále je však třeba brát ohled na další parametry ovlivňující kvalitu návrhu hlavy. Od dobré vytlačovací hlavy se tedy dále očekává co nejnižší tlaková ztráta  $Pd$  a co nejrovnoměrnější uvolňování materiálu z tokového kanálu posuzovaného z rychlosti uvolňování  $Vl$ . Za penalizační parametr se dá považovat smykové napětí  $Ss$  v několika částech hlavy, jehož hodnota by neměla klesnout pod požadovanou hranici. V této kapitole bude popsán způsob hodnocení jednotlivých výstupních parametrů a následně sestavení cílové funkce nutné k ohodnocení kvality daného řešení.

### 8.1 Tlaková ztráta

Tlaková ztráta je modelem vypočten jako jediná hodnota tlaku v  $Pa$ . Hodnoty této veličiny se pohybují řádově v jednotkách až desítkách  $MPa$ . Snahou je pak dosáhnout co nejnižší hodnoty této veličiny. Malá hodnota tlakové ztráty je žádoucí z dvou hlavních důvodů. Prvním důvodem je, že energie tlaku je disipací převedena převážně na teplo a to vede k nežádoucímu zahřívání materiálu. Druhý důvod je pak potřeba s pro vysoké tlaky pořídit vytlačovací stroj, který vyšších tlaků umožňuje dosáhnout, takový stroj je pak dražší a energeticky náročnější na provoz.

### 8.2 Výstupní objemový tok

Objemový tok materiálu na výstupu hlavy je z modelu získáván jako pole hodnot toku v několika místech po obvodu výstupu vytlačovací hlavy v  $cm^3/s$ . Pro posouzení rovnoměrnosti je z těchto hodnot vypočítán rozptyl  $\sigma^2$  dle vzorce

$$\sigma^2(Qv) = \sum_{n=1}^N (Qv_n - E(Qv))^2 \quad (16)$$

kde  $Qv_n$  jsou hodnoty toku a  $E(Qv)$  je střední hodnota toku která je v tomto případě odhadnuta pomocí aritmetického průměru. Účelem optimalizace je minimalizace tohoto parametru. Jak již bylo zmíněno, tento parametr má největší vliv na kvalitu výrobku.

### 8.3 Rychlost uvolňování materiálu z kanálu

Rychlost uvolňování materiálu model generuje jako pole hodnot rychlosti materiálu v bodech nad kanálem vedoucím materiál. Jednotky této veličiny jsou  $mm/s$ . Kvalita tohoto parametru je posuzována pomocí součtu čtverců rozdílů  $Es$  mezi vypočítanou a požadovanou hodnotou průběhu parametru. Ideální rychlost uvolňování by měla mít lineární průběh. Data jsou proto proložena přímkou, která je považována za požadovaný průběh od kterého se odečítají vypočítané hodnoty a takto vzniklé rozdíly se sčítají dle vzorce

$$Es(Vl) = \sum_{n=1}^N (Vl_n - Vlo_n)^2 \quad (17)$$

kde  $Vl_n$  jsou hodnoty vypočítané rychlosti a  $Vlo_n$  jsou hodnoty optimálního průběhu rychlosti. Hodnota výsledného součtu dává parametr, který je opět nutno minimalizovat.

### 8.4 Smykové napětí

Smykové napětí (udáváno v Pa) je parametr, který je sledován na několika místech hlavy. Jeho hodnota by ideálně neměla v žádném místě klesnout pod  $30 kPa$ . Tento parametr je důležitý pro pohyb materiálu ve vytlačovací hlavě. Při příliš nízkých hodnotách může dojít k usazování materiálu a jeho zahořívání. Výpočet penalizační hodnoty  $PSs$  provedeme tak, že pokud hodnota smykového napětí je nižší než  $30 kPa$ , pak

$$PSs = \frac{30\,000 - Ss}{1000} \quad (18)$$

čímž získáme penalizační hodnotu  $PSs$  v rozsahu 0 - 30.

### 8.5 Sestavení účelové funkce

Jak už bylo popsáno, všechny výstupní parametry mající vliv na kvalitu daného řešení jsou formulovány ve tvaru, který je třeba minimalizovat. Proto je možné účelovou funkci sestavit jako součet hodnot těchto parametrů. Vzhledem k velkým řádovým rozdílům hodnot těchto parametrů a rozdílným prioritám jsou použity váhy. Hodnota vah je volena dle řádů, v jakých se pohybují optimální hodnoty daného parametru.

Pro tlakovou ztrátu  $Pd$ , která se pohybuje v hodnotách řádově  $10^6$ , byla zvolena hodnota váhy  $w_1$   $10^{-7}$ . Vážená hodnota se tedy bude pohybovat v desetínách až jednotkách. Rozptyl výstupního objemového toku  $Qv$  se pohybuje v řádech  $10^{-6}$ , zvolená váha  $w_2$  je pak  $10^7$ . Parametr  $Es$  rychlosti uvolňování materiálu  $Vl$  je pak v řádech  $10^1$  a váha  $w_3$  je nastavena na  $10^{-2}$ .

Celkový součet parametrů se pak penalizuje přičtením hodnoty  $PSs$ . Výsledná podoba účelové funkce je tedy

$$Cf(Pd, Qv, Vl) = w_1Pd + w_2\sigma^2(Qv) + w_3Es(Vl) + PSs \quad (19)$$

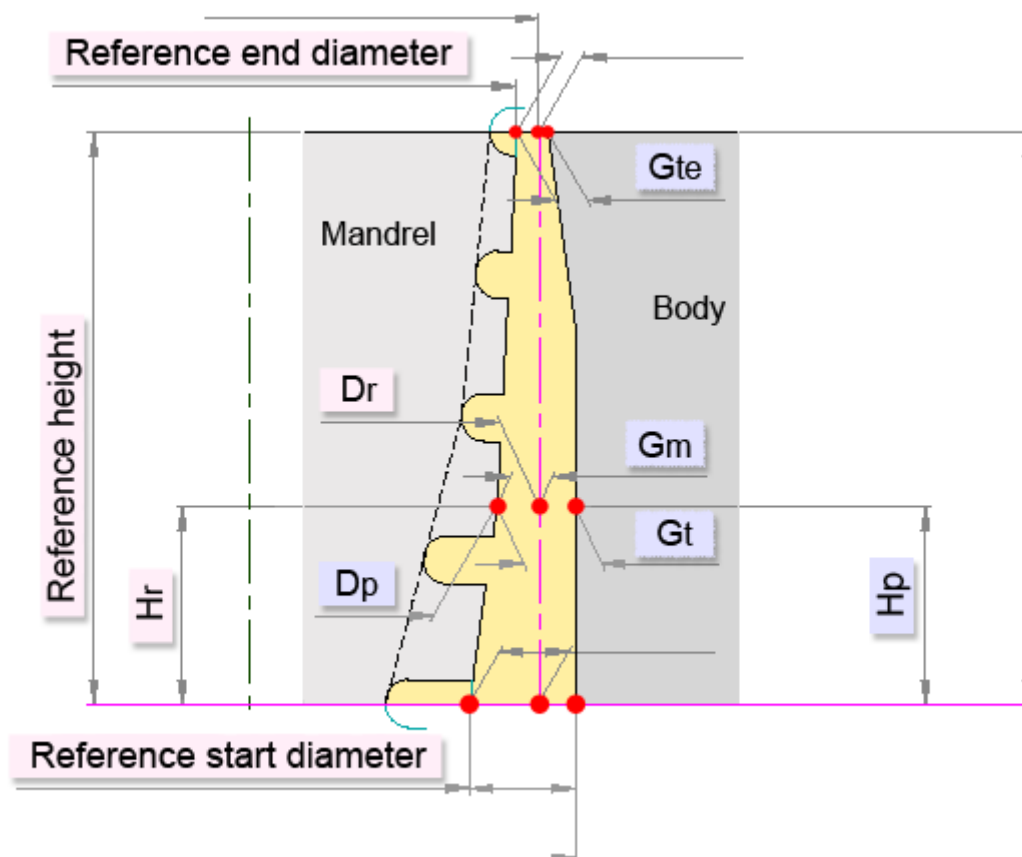
## 9 NASTAVITELNÉ PARAMETRY

Návrh vytlačovací hlavy je omezen jen několika málo hraničními podmínkami. Kupříkladu prostor, který může zabírat tokový kanál je omezen celkovými rozměry vytlačovací hlavy, umístěním ostatních kanálů (týká se vytlačovacích hlav pro koextruzi) anebo jinými přívodními kanály (např. u hlav pro potahování materiálu plastem). Dodatečná omezení pak vyplývají pouze z použité metody výroby a vyrobitelnosti požadované geometrie.

Jako nastavitelné parametry byly zvoleny rozměry geometrie, které jsou společné pro všechny návrhy vytlačovacích hlav a mají zároveň vliv na tok materiálu v dutině hlavy.

### 9.1 Počáteční mezera mezi tělem a jádrem

Prvním nastavitelným parametrem je velikost mezery  $Gts$  mezi jádrem hlavy (Mandrel) a tělem (Body). Jde o rozměr, který je na Obr. 10 značen  $Gt$  a je měřen v místě počátku kanálu, kde je přiváděn roztavený materiál do hlavy. Tento parametr má hlavně vliv na rychlost uvolňování materiálu nad počátkem spirálového kanálu.



Obr. 10. Řez tokovým kanálem vytlačovací hlavy

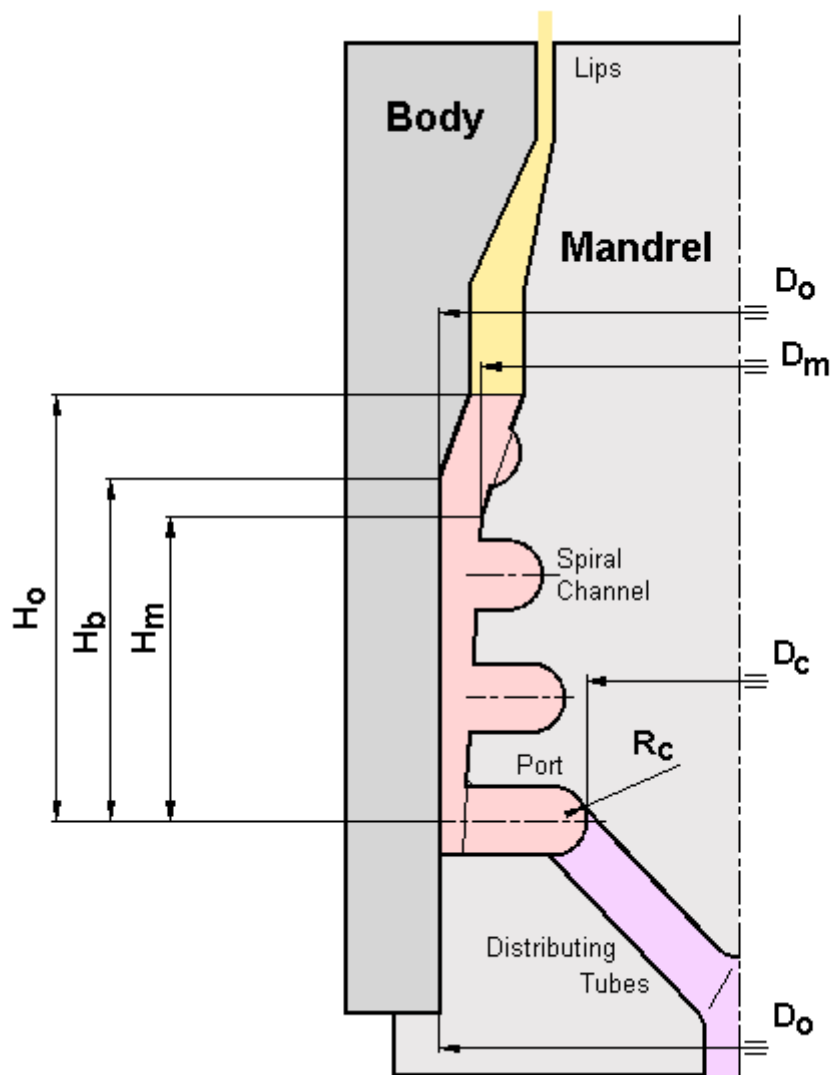


## 9.2 Mezera na výstupu hlavy

Mezera na výstupu hlavy  $G_{te}$  (Obr. 10) představuje stejný rozměr jako počáteční mezera s tím rozdílem, že je měřen v místě kde materiál opouští hlavu (tzn. na opačné straně hlavy oproti  $G_{ts}$ ).

## 9.3 Poloměr kanálu

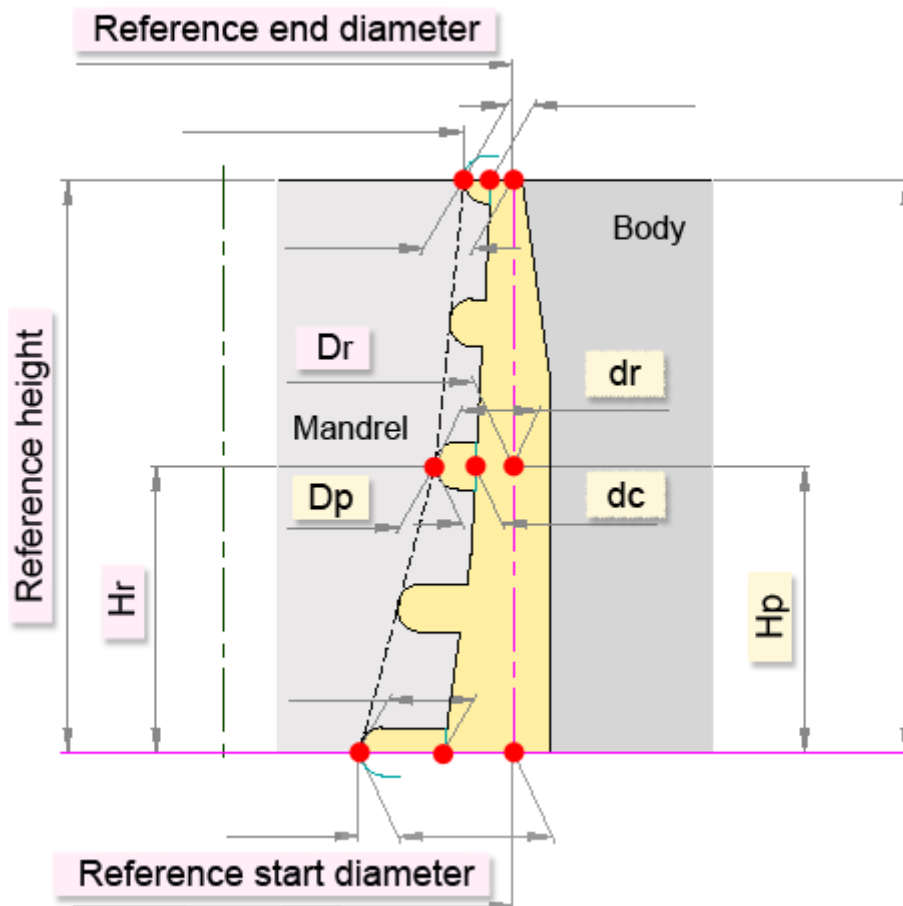
Tento parametr udává poloměr  $R_c$  (Obr. 11) spirálové části tokového kanálu po celé jeho délce.



Obr. 11. Řez tokovým kanálem vylučovací hlavy

## 9.4 Počáteční hloubka kanálu

Parametr počáteční hloubky  $dcs$  je rozměr odpovídající rozměru  $dc$  (Obr. 12) měřenému na počátku spirálového kanálu kde je jeho hodnota největší.



Obr. 12. Řez tokovým kanálem vytlačovací hlavy

## 10 VIZUALIZACE ODEZVY MODELU HLAVY

Vizualizace byla realizována výpočtem hodnot účelové funkce pro několik hodnot každého parametru. Konkrétně bylo zvoleno 20 hodnot pro každý vstupní parametr v daném intervalu. Intervaly neboli rozsahy hodnot parametrů byly zvoleny s ohledem na celkové fyzické rozměry hlavy. Při počtu 4 parametrů a 20 hodnot na každý parametr bylo tedy pro vizualizaci vypočítáno celkově  $20^4$  řešení.

K vizualizaci byl použit software Wolfram Mathematica s ohledem na předchozí zkušenosti s jeho používáním a možností vizualizace 3D grafiky. Data jsou reprezentována v 3D prostoru kde každá osa představuje jeden ze vstupních parametrů. Čtvrtý parametr je pak nastavitelný a umožňuje tak sledovat změny hodnot účelové funkce se změnou daného parametru. Samotné hodnoty cílové funkce jsou reprezentovány jako body v parametrickém prostoru, jejichž barva vyjadřuje hodnoty od nejnižší modré až po červenou, která představuje hodnoty nejvyšší (Obr. 13). Byly tedy vytvořeny 4 3D grafy kde každý z nich umožňuje měnit hodnoty jedné vstupní proměnné.

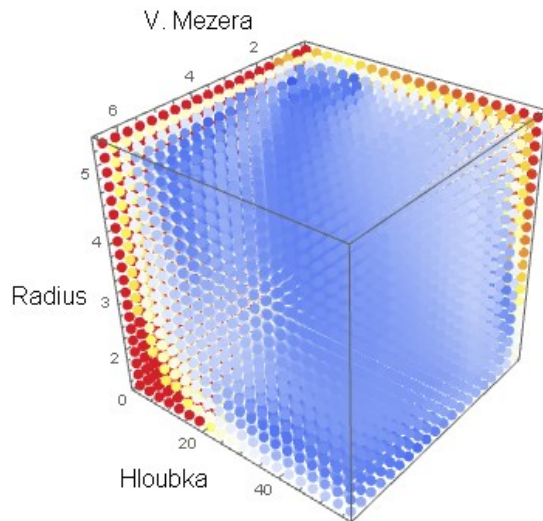


Obr. 13. Barevné schéma hodnot cílové funkce

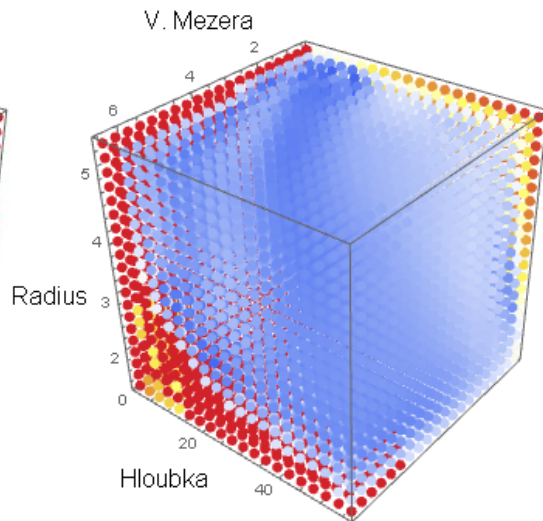
Ve zbytku této kapitoly se nachází ukázky těchto 4 grafů. Pro ilustraci byly vloženy 4 varianty každého grafu s různým nastavením hodnot nastavitelné vstupní proměnné. Notebooky (zdrojové soubory) s interaktivními grafy budou přiloženy jako příloha samotné diplomové práce.

## 10.1 Vizualizace vlivu změny počáteční mezery

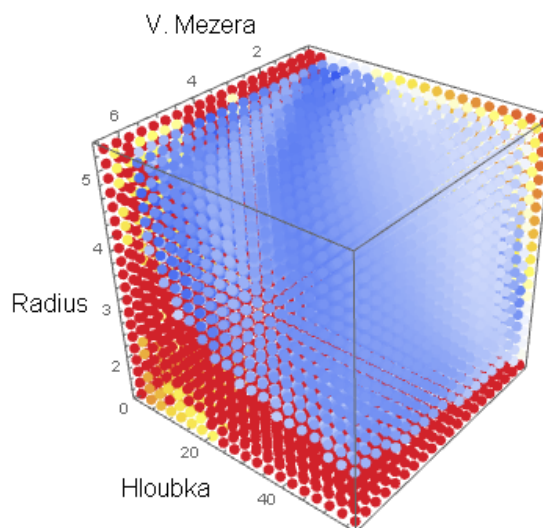
Následující obrázky jsou vizualizací změny počáteční mezery mezi tělem spirálové hlavy a jejím jádrem. Uvedeny jsou 4 ukázky s různou velikostí této mezery.



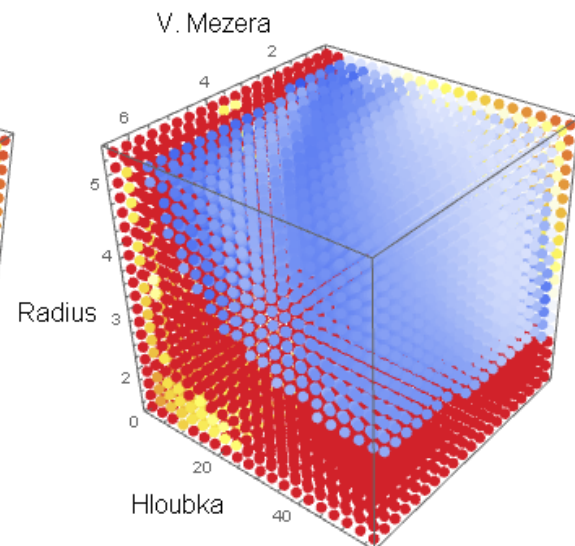
Obr. 14. Počáteční mezera 0 mm



Obr. 15. Počáteční mezera 0,34 mm



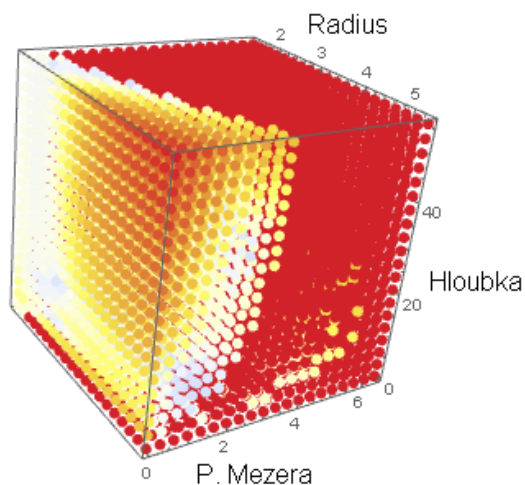
Obr. 16. Počáteční mezera 0,68 mm



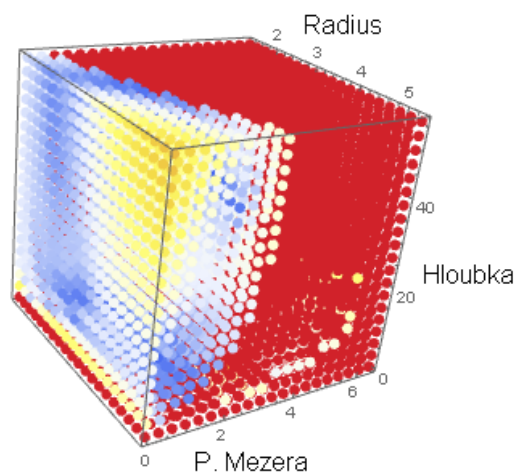
Obr. 17. Počáteční mezera 1,02 mm

## 10.2 Vizualizace změny výstupní mezery

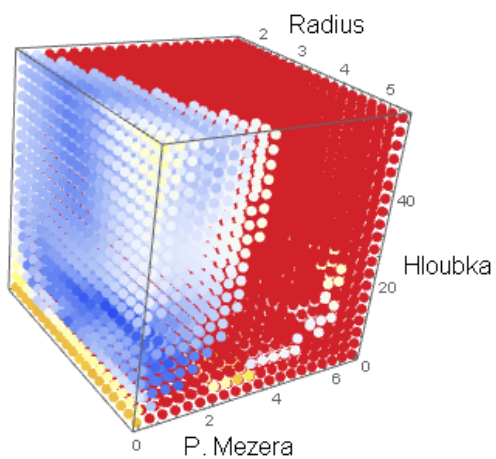
Obrázky v této podkapitole jsou vizualizací změny výstupní mezery mezi tělem spirálové hlavy a jejím jádrem. Uvedeny jsou 4 ukázky s různou velikostí této mezery.



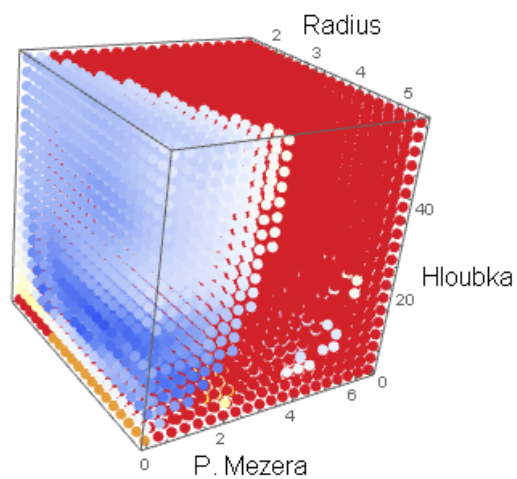
Obr. 18. Výstupní mezera 0,5 mm



Obr. 19. Výstupní mezera 0,82 mm



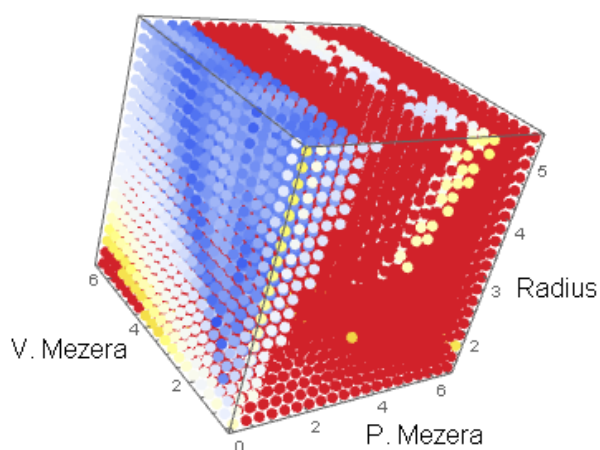
Obr. 20. Výstupní mezera 1,13 mm



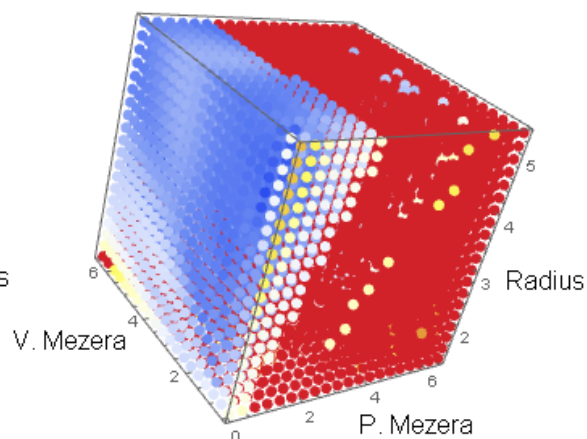
Obr. 21. Výstupní mezera 1,45 mm

### 10.3 Vizualizace změny hloubky na počátku spirálového kanálu

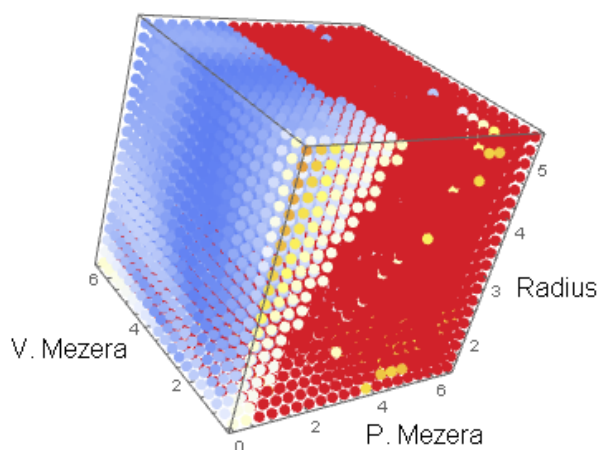
Tato podkapitola zobrazuje vizualizaci změny počáteční hloubky spirálového kanálu. Uvedeny jsou 4 ukázky s různou počáteční hloubkou.



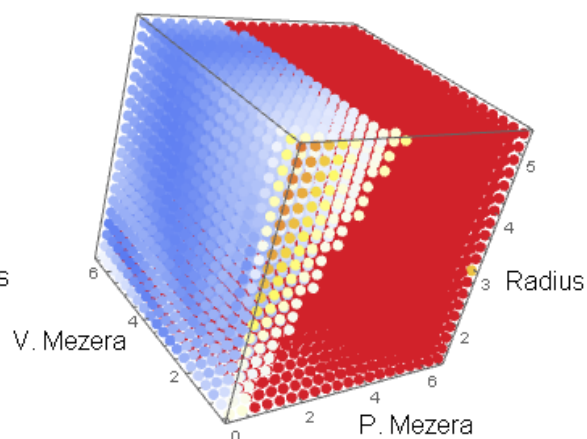
Obr. 22. Hloubka kanálu 9,26 mm



Obr. 23. Hloubka kanálu 18,02 mm



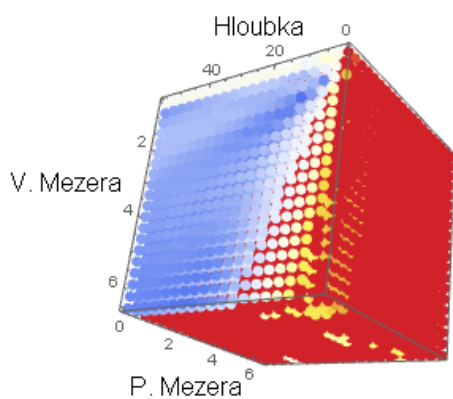
Obr. 24. Hloubka kanálu 23,87 mm



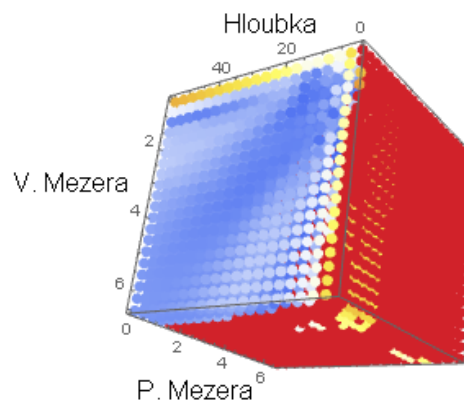
Obr. 25. Hloubka kanálu 32,63 mm

## 10.4 Vizualizace změny poloměru spirálového kanálu

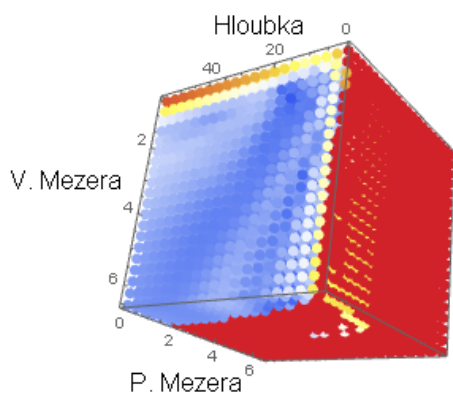
Poslední podkapitola je vizualizací změny poloměru spirálového kanálu. Uvedeny jsou 4 ukázky s různou velikostí tohoto parametru.



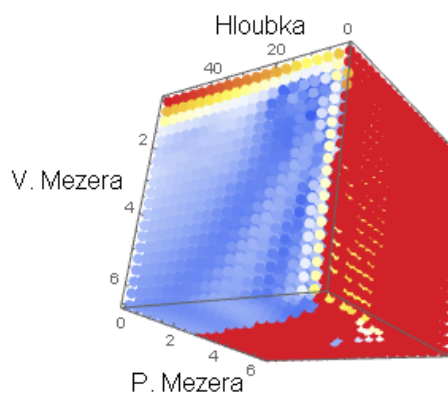
Obr. 26. Poloměr kanálu 1,96 mm



Obr. 27. Poloměr kanálu 3,01 mm



Obr. 28. Poloměr kanálu 4,07 mm



Obr. 29. Poloměr kanálu 5,33 mm

## 11 SROVNÁNÍ OPTIMALIZAČNÍCH ALGORITMŮ

Pro srovnání bylo vybráno několik základních zástupců evolučních optimalizačních algoritmů schopných řešit black box problémy. Bylo provedeno 30 testů pro každý algoritmus, kde byl sledován průměrný průběh nejlepší nalezené funkční hodnoty  $Cf(x)$  v závislosti na počtu ohodnocení  $PO$  této funkce a z výsledných hodnot pak byly vypočítány základní statistické parametry. K testování byl použit Framework EvA2 obsahující implementace optimalizačních metod, zmíněný v teoretické části práce.

### 11.1 Nastavení použitých algoritmů

Pro všechny parametry byly zvoleno nastavení populace na 50 členů. Ukončovací podmínka byla nastavena na 20 000 ohodnocení. Nastavení specifických parametrů pak bylo následující. [12]

<b>Diferenciální Evoluce:</b>	$Cr = 0,8$	$F = 0,5$		
<b>PSO:</b>	$C_1 = 1,5$	$C_2 = 1,5$	$v_0 = 0$	$w = 0,72$
<b>Genetický algoritmus:</b>	Ruletový výběr rodičů		Náhodný výběr partnerů	
	Počet partnerů 1			

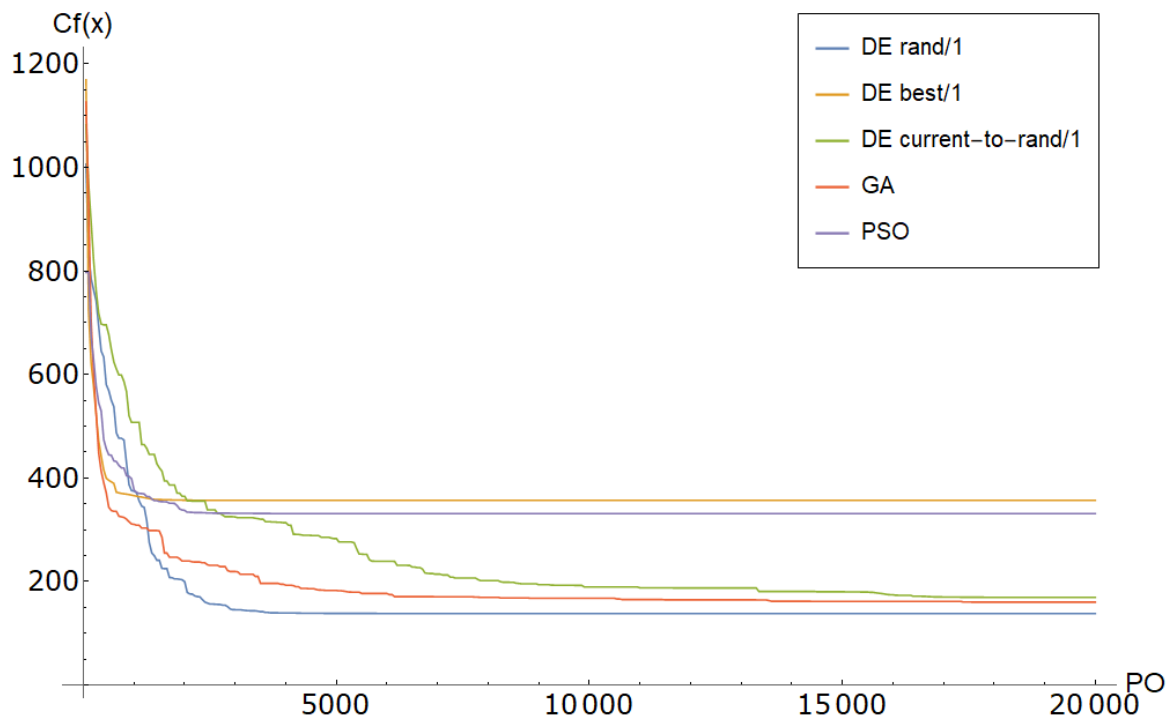
Nastavení hranic prohledávaného prostoru pak bylo s ohledem na rozměry vytlačovací hlavy zvoleno:

<b>Počáteční mezera:</b>	0 mm – 5 mm
<b>Výstupní mezera:</b>	0,5 mm – 5 mm
<b>Poloměr kanálu:</b>	1 mm – 6mm
<b>Počáteční hloubka:</b>	1 mm – 56 mm

### 11.2 Výsledky testů

Obr. 30 zobrazuje zprůměrované hodnoty všech běhů pro každý testovaný algoritmus. Z výsledků vyplývá multimodálnost optimalizované funkce  $Cf$ , kdy některé algoritmy jako DE best/1 mají tendenci velmi rychle konvergovat do lokálních extrémů, zatímco algoritmus DE rand/1 prokázal lepší schopnost explorační a nalezení dobrých výsledků.





Obr. 30. Konvergenční křivky testovaných algoritmů

Statistické parametry výsledných hodnot ukazují jako nejlepšího kandidáta již zmiňovaný algoritmus DE rand/1. Ten byl schopen nalézt nejnižší hodnoty a jeho nejhorší hodnoty jsou menší než u ostatních algoritmů. Rozptyl jeho hodnot vyjádřený pomocí směrodatné odchylky je také nejmenší což znamená, že byl schopen výsledné hodnoty nacházet nejspolehlivěji.

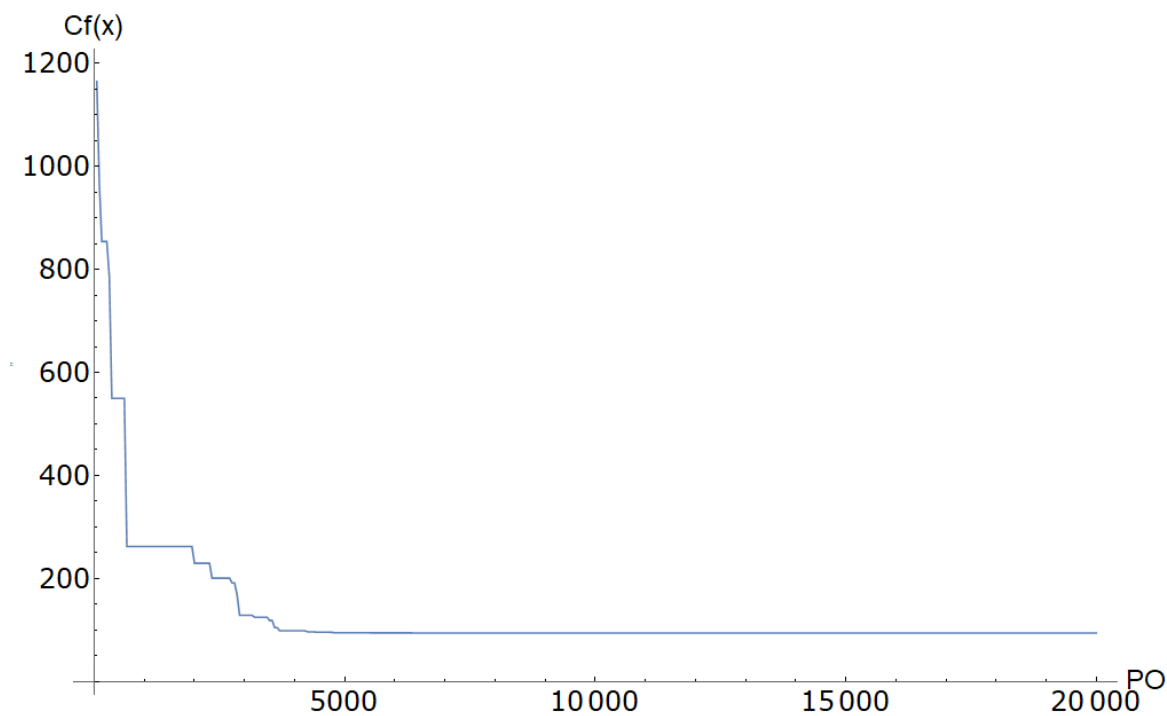
ALGORITMUS	MINIMUM	MAXIMUM	MEDIÁN	PRŮMĚR	SM. ODCH.
<b>PSO</b>	105.575	537.818	389.543	330.897	161.191
<b>GA</b>	96.2414	412.457	101.167	159.888	111.466
<b>DE BEST/1</b>	96.8083	1039.68	306.149	356.762	273.054
<b>DE C-TO-R</b>	94.679	405.068	96.5101	169.028	126.709
<b>DE RAND/1</b>	94.6754	273.089	94.6771	138.045	75.1006

Tab. 1. Statistické parametry nalezených hodnot cílové funkce

## 12 NÁVRH ÚPRAV VYBRANÉHO OPTIMALIZAČNÍHO ALGORITMU

Z vyhodnocení předchozích testů vyplývá jako nejlepší kandidát pro implementaci dodatečných změn algoritmus diferenciální evoluce s mutační strategií rand/1.

Jednou z možností jak zlepšit schopnost algoritmu nalézt výsledek je změna nastavitelných parametrů. Jako první změna bude tedy aplikováno dynamické generování parametrů  $Cr$  a  $F$  při běhu algoritmu. Počáteční nastavení parametrů bude ponecháno na uživateli. V našem případě bude použito stejné počáteční nastavení jako při předchozím testování algoritmu ( $Cr = 0,8$  a  $F = 0,5$ ). Změna pak spočívá ve vygenerování náhodných parametrů  $Cr$  a  $F$  pro každého jedince pomocí generátoru pseudonáhodný čísel s normálním rozdělením kde jako střední hodnota je využita aktuální hodnota  $Cr$  a  $F$ . Směrodatná odchylka je volena jako hodnota 1. Při porovnávání jedinců jsou pak hodnoty parametrů zlepšujících se jedinců zaznamenávány do paměti a průměrná hodnota v této paměti je pak na konci jednoho generačního cyklu využita jako střední hodnota pseudonáhodného generátoru pro cyklus další. Toto se opakuje každý generační cyklus a do běhu algoritmu se tak zavádí nová dynamická složka, která může ovlivnit schopnost nalezení řešení problému. Při stagnaci populace, to znamená, když po určitý počet generací nebude docházet ke zlepšení, budou parametry resetovány zpět na počáteční hodnotu. Počet generací, po kterých k resetu dojde, byl zvolen dle jednoho z testovacích běhů, kdy došlo k nejdelsí prodlevě mezi změnami nejlepší nalezené funkční hodnoty (Obr. 31). Tato prodleva čítala 26 generací, po které se nezlepšila nalezená hodnota. Hranice resetování parametrů byla tedy zvolena 30 s ohledem na toto číslo.

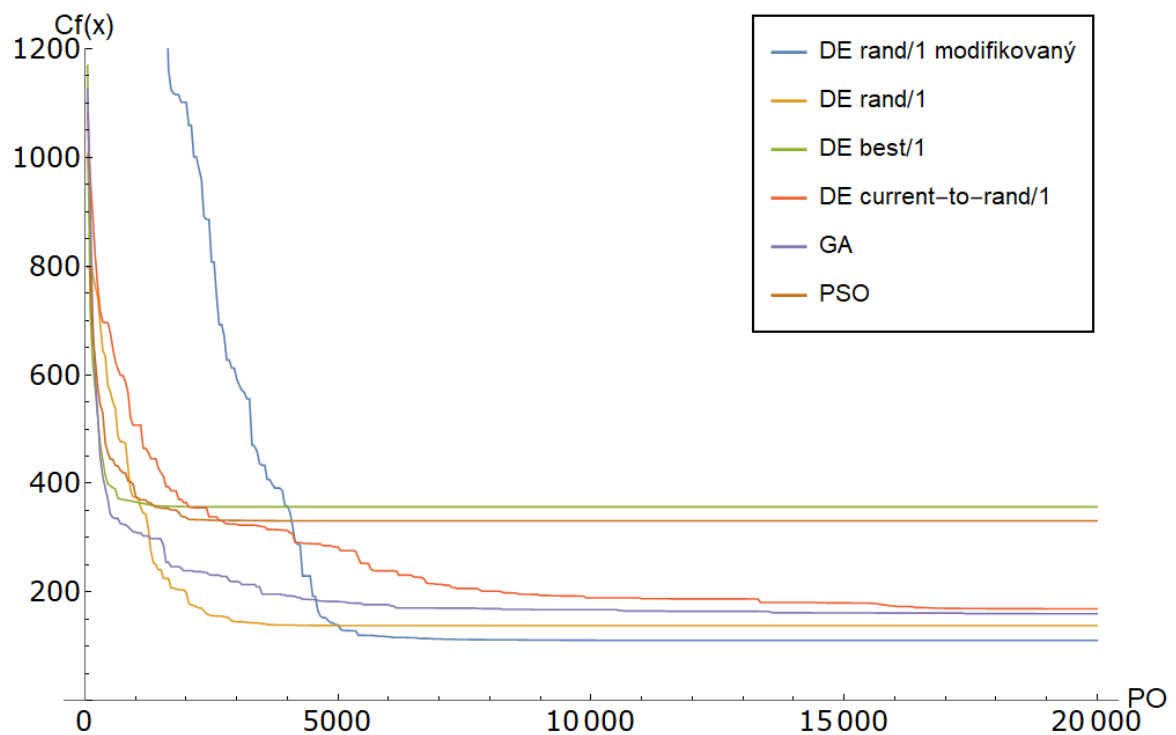


Obr. 31. Průběh testu DE rand/1

Modifikovaná optimalizační metoda byla pak pro testování samostatně implementována v jazyce C++ a zdrojový kód i se změnami bude přiložen na CD příloze diplomové práce.

### 13 TEST ALGORITMU

Průměr 30 běhů upraveného algoritmu byl porovnán s předchozími testy. Z výsledků vyplývá, že byl schopen nalézt v průměru nižší hodnoty než ostatní algoritmy a došlo tedy ke zlepšení schopnosti algoritmu nalézt minimum. Z grafu je patrné, že algoritmy frameworku EvA2 mají lépe inicializovanou počáteční populaci, protože počátky grafů se nachází na mnohem menších hodnotách než počátek grafu modifikovaného algoritmu. Toho mohlo být docíleno buď volbou generátoru s normálním rozdělením pro generování prvotní generace. To by znamenalo horší pokrytí prohledávaného prostoru, ale více jedinců by se nacházelo v oblasti blíže optimu.



Obr. 32. Srovnání upraveného algoritmu s předchozími testy

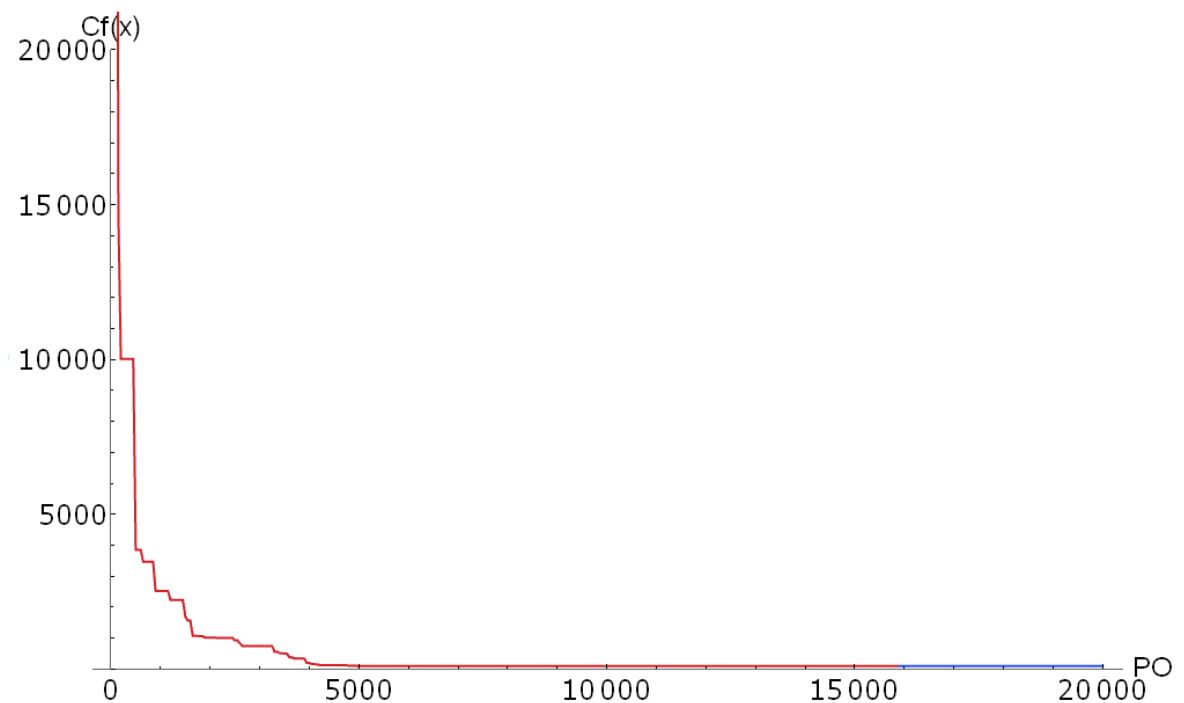
Ze statistik Tab. 2 je vidět zlepšení průměrné nalezené hodnoty i rozptylu dle směrodatné odchylky při zachování minimální nalezené hodnoty. Modifikace je v tabulce označena jako \*DE RAND/1.

ALGORITMUS	MINIMUM	MAXIMUM	MEDIÁN	PRŮMĚR	SM. ODCH.
<b>PSO</b>	105.575	537.818	389.543	330.897	161.191
<b>GA</b>	96.2414	412.457	101.167	159.888	111.466
<b>DE BEST/1</b>	96.8083	1039.68	306.149	356.762	273.054
<b>DE C-TO-R</b>	94.679	405.068	96.5101	169.028	126.709
<b>DE RAND/1</b>	94.6754	273.089	94.6771	138.045	75.1006
<b>*DE RAND/1</b>	94.6769	175.506	94.6775	110.843	36.1476

Tab. 2. Srovnání statistických parametrů

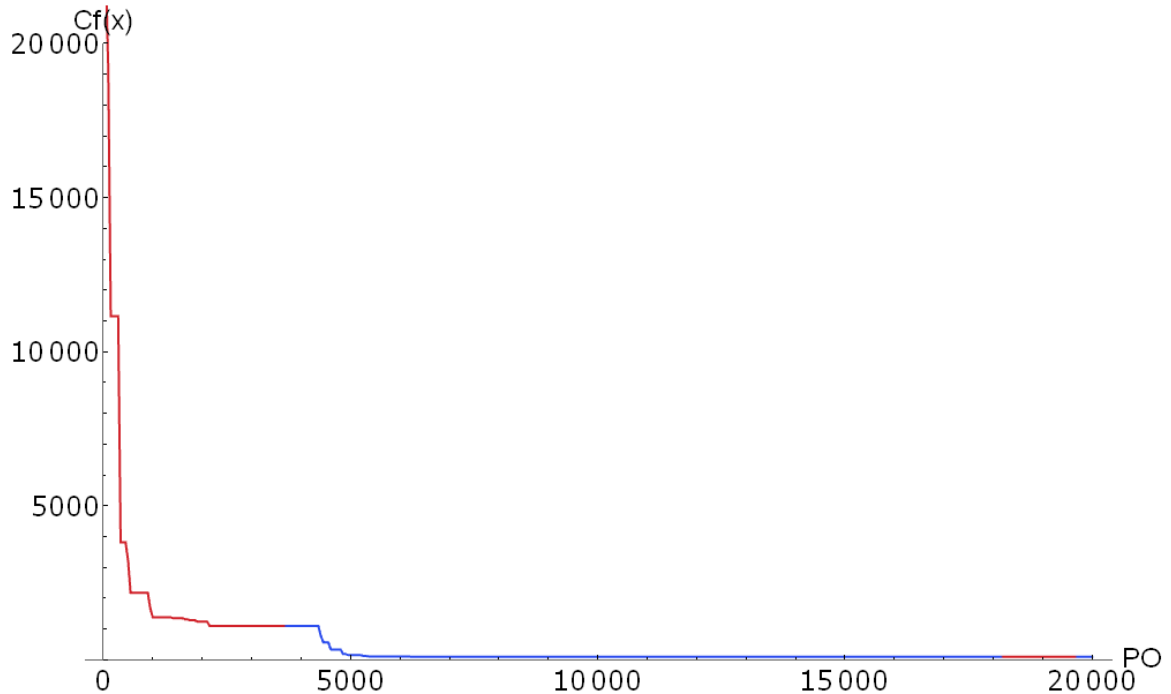
Během testování byl také pozorován vliv resetu parametrů na konvergenci. Byly sestaveny grafy s vizualizací, kde byly barevně odlišeny oblasti mezi resety. Barva grafu přechází mezi modrou a červenou barvou v místech kde došlo k resetování.

U většiny testů došlo k tomuto jevu až po nalezení minimální hodnoty (Obr. 33) a nelze tedy potvrdit, zda je tato vlastnost algoritmu pozitivním přínosem.



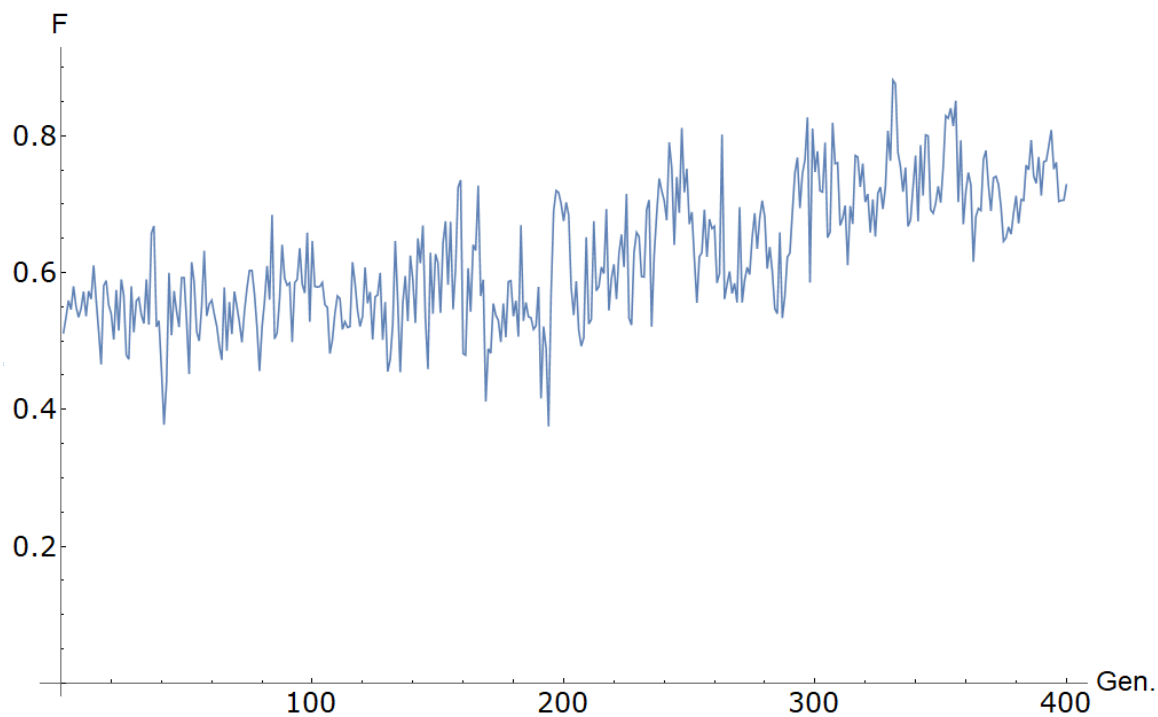
Obr. 33. Konvergenční křivka jednoho z testů modifikovaného algoritmu

Byl však zaznamenán i případ (Obr. 34), kdy k resetu došlo před nalezením minima, po kterém se nalezená hodnota začala opět zlepšovat. Nelze tedy ani vyloučit pozitivní vliv resetu na konvergenci algoritmu.

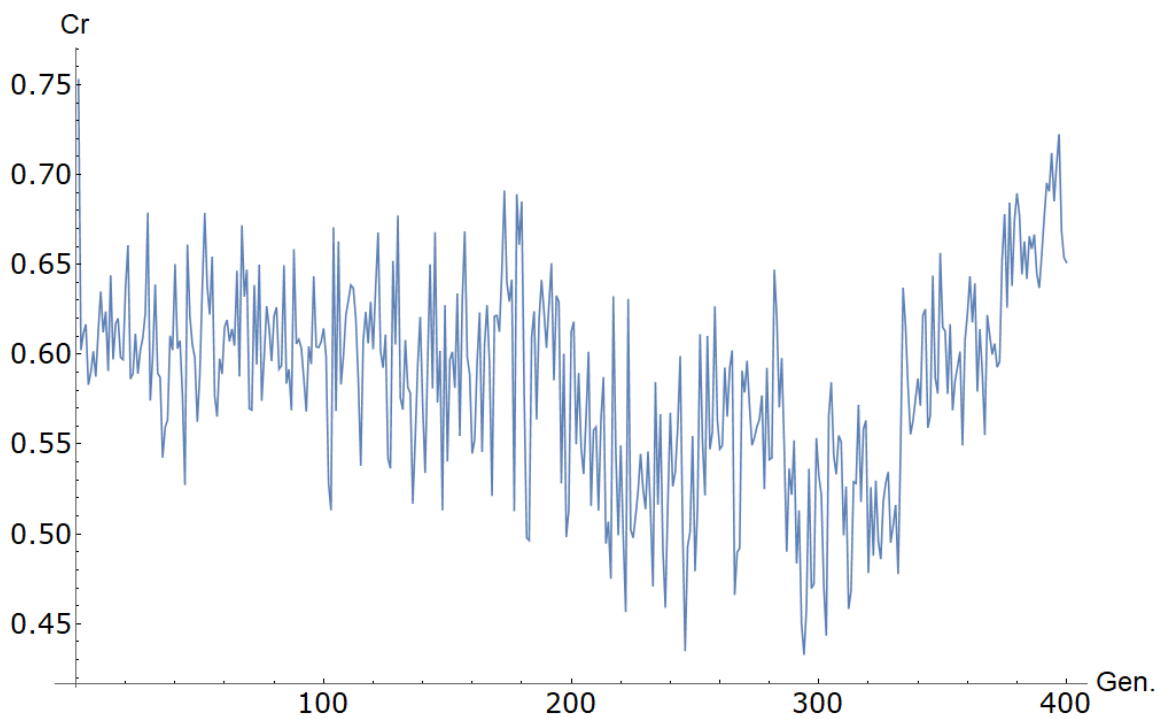


Obr. 34. Konvergenční křivka jednoho z testů modifikovaného algoritmu

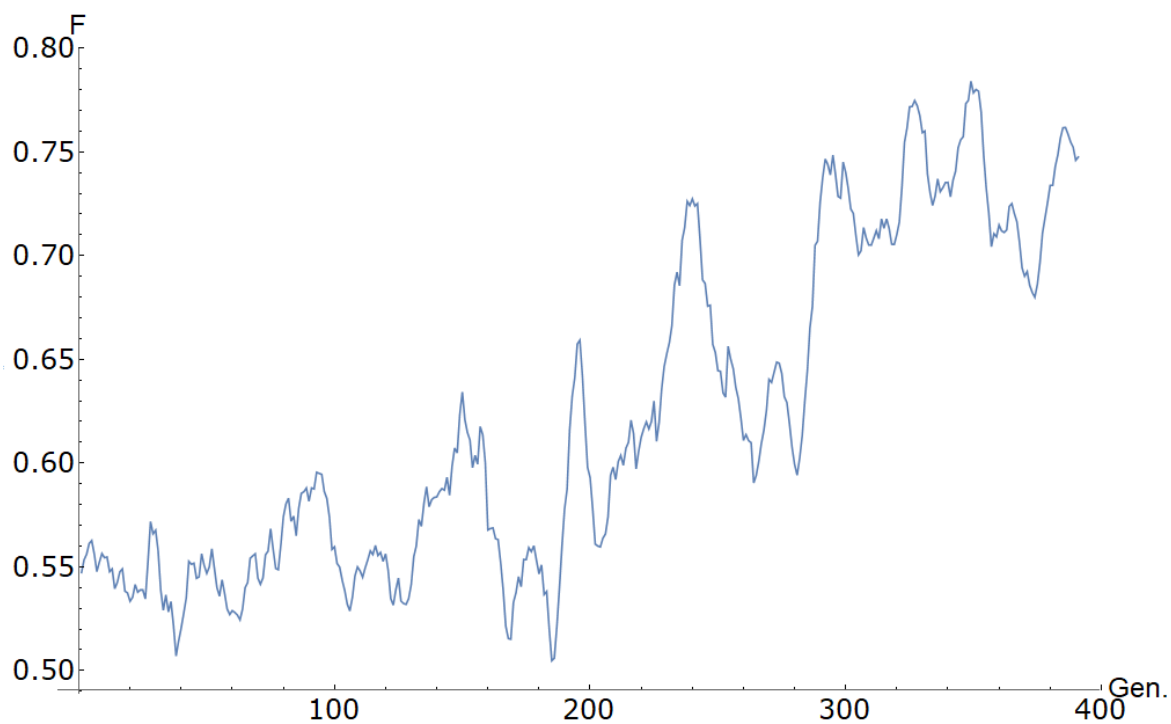
Průběh průměrných hodnot parametrů  $Cr$  a  $F$  během všech generací je zobrazen na Obr. 35 a Obr. 36. Dále Obr. 37 a Obr. 38 zobrazují průběh těchto parametrů pomocí klouzavého průměru. U parametru  $F$  je znatelný stoupavý trend s pravidelnými propady, které mohou být způsobeny resetem hodnoty. Parametr  $Cr$  si pak spíše udržuje hodnotu a později klesá. Náhlý nárůst parametru na konci grafu může být způsoben větší četností resetů ke konci běhu algoritmu.



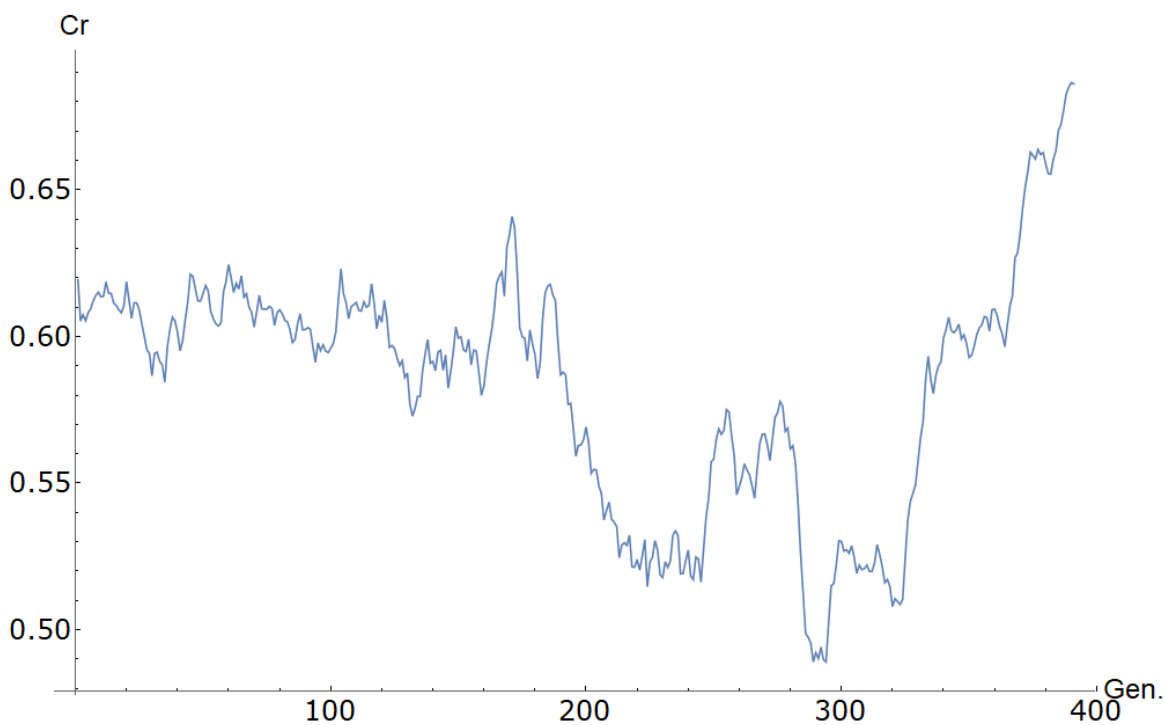
Obr. 35. Průběh průměrné hodnoty parametru F



Obr. 36. Průběh průměrné hodnoty parametru Cr



Obr. 37. Průběh klouzavého průměru parametru F



Obr. 38. Průběh klouzavého průměru parametru Cr

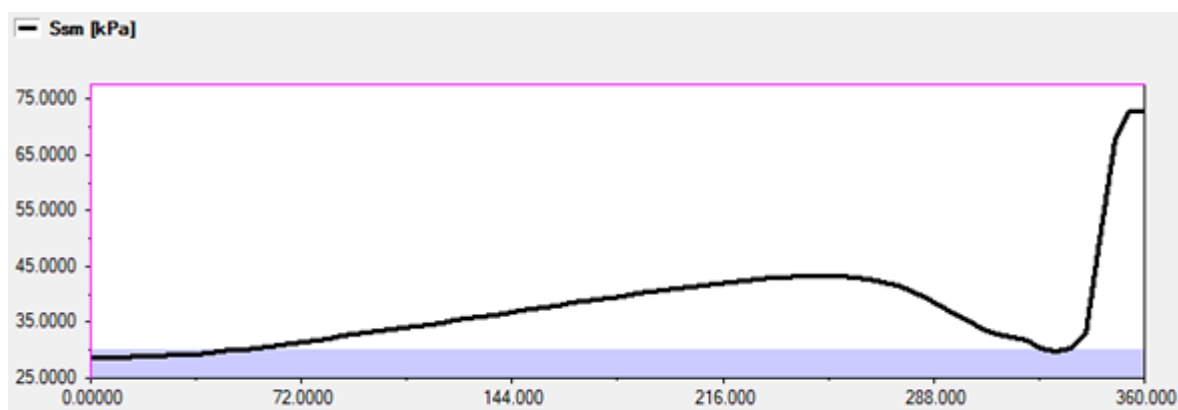


## 14 OTESTOVÁNÍ ALGORITMU NA EXISTUJÍCÍCH PROJEKTECH

V této kapitole budou za pomoci vytvořeného algoritmu vyhledány vhodné parametry 3 již existujících projektů geometrií a budou zhodnoceny výstupní parametry vytlačovacích hlav s takto nastavenými parametry. Z legálních důvodů nelze uvést konkrétní celkové rozměry hlav. Proto budou uvedeny pouze grafy a hodnocení výstupních parametrů vytlačovací hlavy, podle kterých se dá posoudit kvalita návrhu.

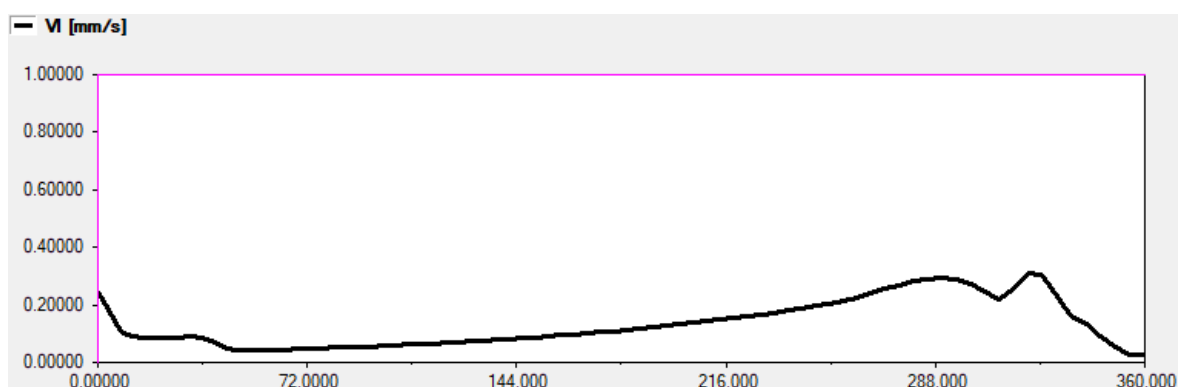
### 14.1 Vytlačovací hlava č. 1

Smykové napětí je ve všech sledovaných místech při nalezených parametrech přijatelné. Nejnižší hodnoty (Obr. 39) se nachází nad nebo na hranici 30kPa a splňují tedy podmínku.



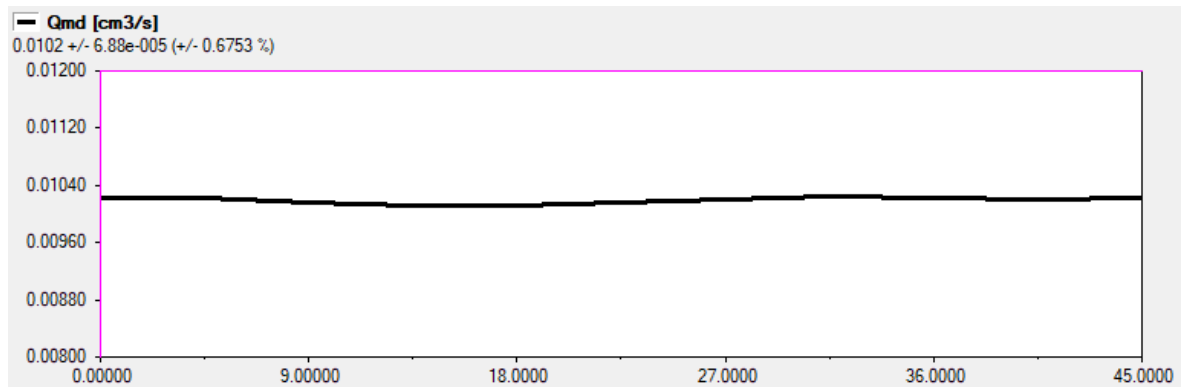
Obr. 39. Smykové napětí uvnitř spirálového kanálu

Rychlost uvolňování materiálu (Obr. 40) je dostatečně lineární.



Obr. 40. Rychlost uvolňování materiálu ze spirálového kanálu

Nejdůležitější parametrem je rovnoměrnost objemového toku materiálu na výstupu (Obr. 41). Hodnota rozptylu 0.6% střední hodnoty je velmi dobrá.

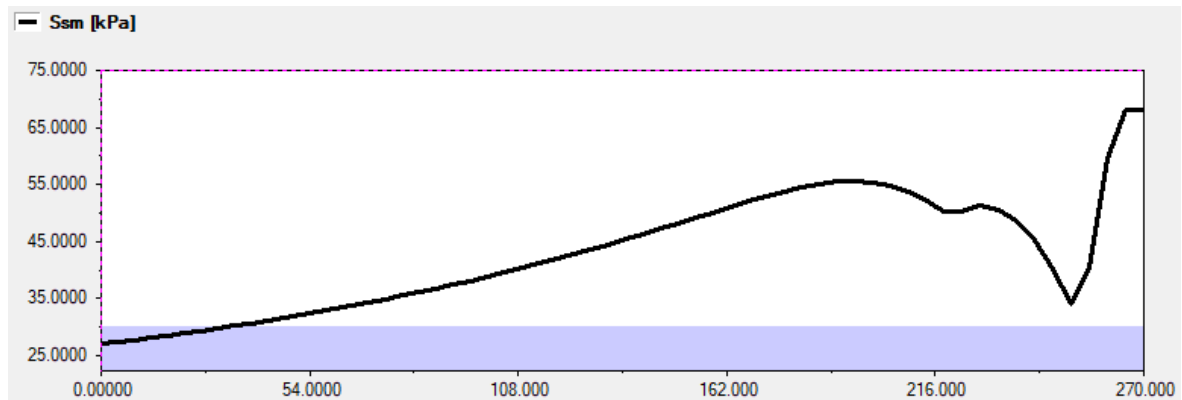


Obr. 41. Objemový průtok na výstupu hlavy

Tlaková ztráta se pohybuje kolem 5 MPa. Nalezené parametry jsou tedy postačující k bezproblémové funkci navržené geometrie.

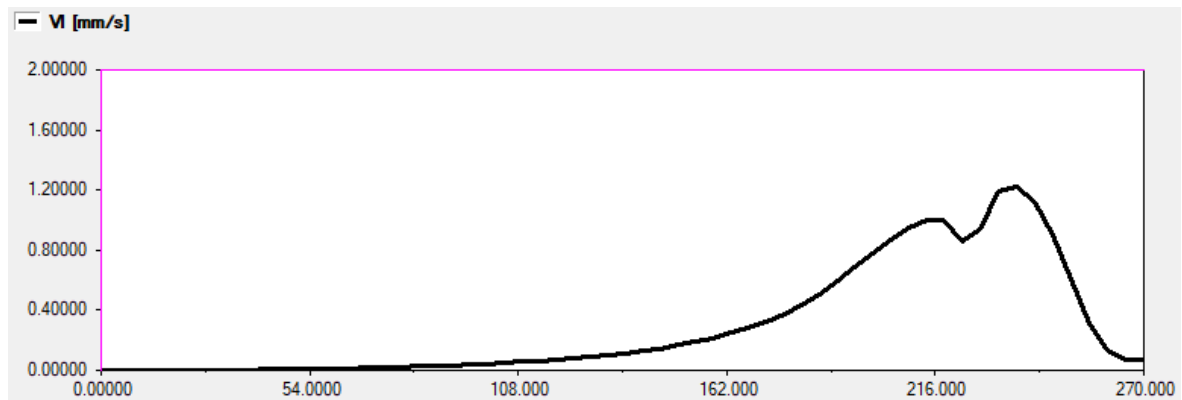
## 14.2 Vytlačovací hlava č. 2

Nejnižší hodnoty smykového napětí (Obr. 42) se opět nachází uvnitř spirálového kanálu. Je patrné, že některé hodnoty lehce klesají pod kritickou hranici 30 kPa. Pokles je však malý a při dodržení kvality ostatních parametrů zanedbatelný.



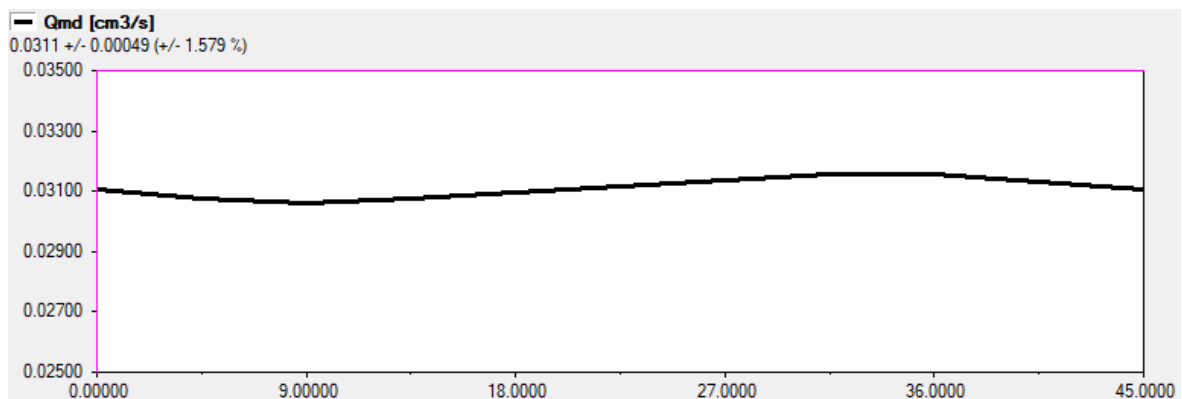
Obr. 42. Smykové napětí uvnitř spirálového kanálu

Rychlost uvolňování materiálu (Obr. 43) je méně lineární než u předchozího případu.



Obr. 43. Rychlost uvolňování materiálu ze spirálového kanálu

Objemový průtok výstupu (Obr. 44) je dostatečně rovnoměrný. Rozptyl činí 1.6% střední hodnoty.



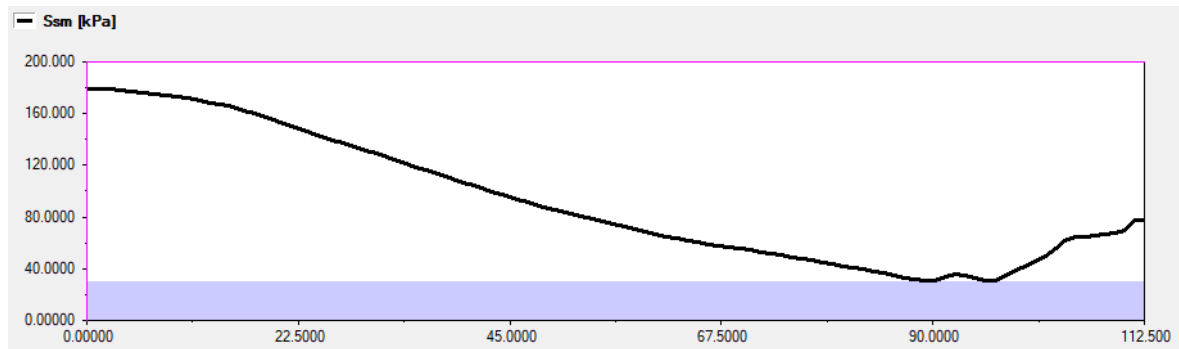
Obr. 44. Objemový průtok na výstupu hlavy

Tlaková ztráta je 9 MPa. Kvalita této geometrie je horší než u předchozího případu avšak bez problémů použitelná.

### 14.3 Vytlačovací hlava č. 3

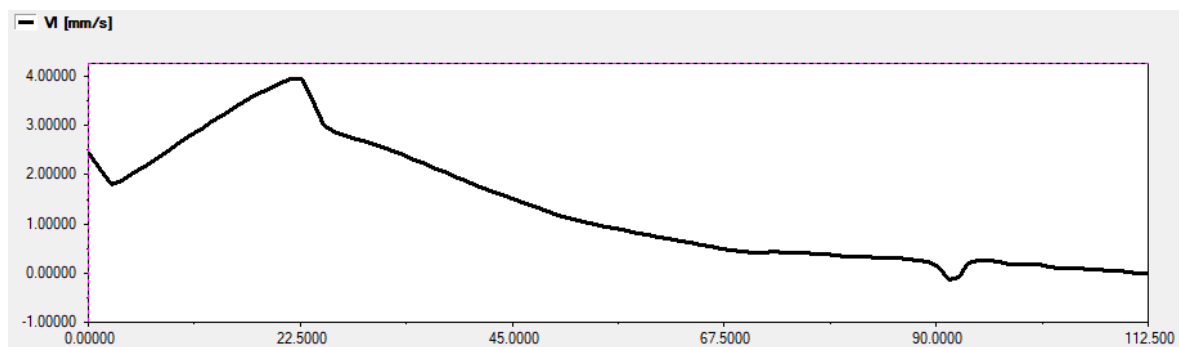
Jedná se o vytlačovací hlavu kónického typu. To znamená, že spirála je vyobráběna do jádra ve tvaru kužele a směrem k výstupu zmenšuje svůj poloměr. O této vytlačovací hlavě se ví, že byla navržena nekvalitně a nelze nalézt řešení uspokojující všechny výstupní podmínky. Tato geometrie byla zahrnuta do testování jen pro ukázkou. Od tohoto návrhu se očekávají v praxi nepoužitelné výsledky.

Smykové napětí se ve všech sledovaných oblastech pohybuje nad požadovanou hranicí 30kPa. Nejnižší hodnoty se nacházejí uvnitř spirálového kanálu (Obr. 45).



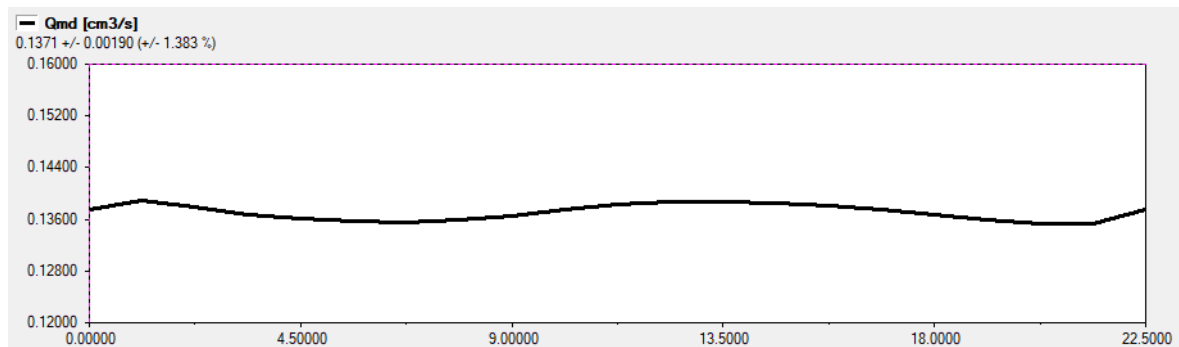
Obr. 45. Smykové napětí uvnitř spirálového kanálu

Vizualizace rychlosti uvolňování materiálu (Obr. 46) ukazuje přijatelně lineární průběh bez velkých výkyvů.



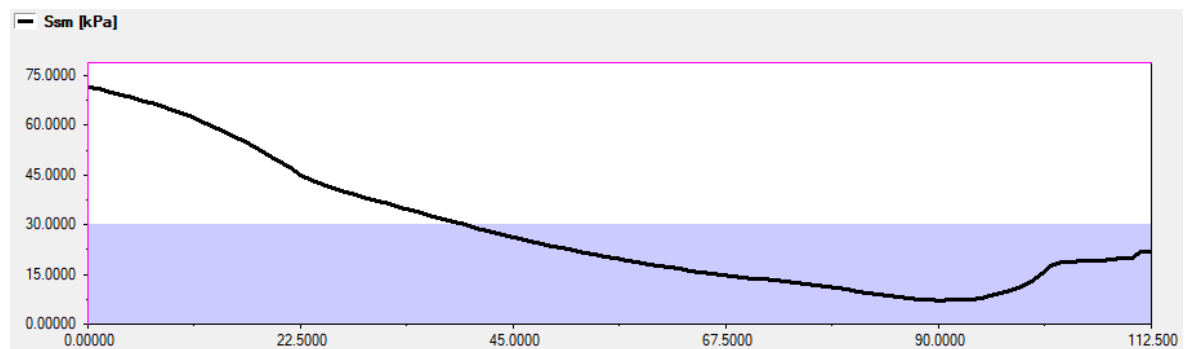
Obr. 46. Rychlost uvolňování materiálu ze spirálového kanálu

Rozptyl objemového průtoku (Obr. 47) na výstupu vytláčovací hlavy je 1,3% střední hodnoty. Tato hodnota je dostačující.



Obr. 47. Objemový průtok na výstupu hlavy

Tlaková ztráta vytlačovací hlavy je pro toto nastavení 29 MPa což je velmi vysoké číslo. Optimalizační algoritmus byl proto opětovně spuštěn s váhou  $w_I$  nastavenou tak aby hodnota tlakové ztráty byla při hledání parametrů dominantní. To vedlo k nalezení řešení s tlakovou ztrátou 4 MPa což je pro tento parametr dobrá hodnota nicméně při tomto nastavení dojde kde zhoršení hodnoty smykového napětí (Obr. 45) pod přijatelnou úroveň.



Obr. 48. Smykové napětí uvnitř spirálového kanálu

Celkově se tedy dá říct, že tato vytlačovací hlava je použitelná jen při vysokých hodnotách tlaku a potvrzuje se, že jde o špatný celkový design.

## ZÁVĚR

Se zvyšujícím se výkonem osobních počítačů, které v dnešní době zvládají ne jednu, ale několik simulací řešeného problému za sekundu se otevírají možnosti pro využití populačních optimalizačních metod vyžadujících velké množství takovéhoto výpočtu k nalezení optima. Tato práce se pak zaměřuje na využití těchto technik pro optimalizaci vytlačovacích hlav pro plasty.

Teoretická část se věnuje popisu použitých optimalizačních technik a nástrojů použitých při vizualizaci a tvorbě algoritmu.

K hodnocení kvality řešení byla navržena cílová funkce zohledňující 3 sledovaná kritéria, kterým byly experimentálně nastaveny váhy. Pro čtvrté sledované kritérium pak byla sestavena penalizační složka cílové funkce.

Provedené testy v praktické části pak ukazují vhodnost využití metody diferenciální evoluce. Nejlepší i nejhorsí nalezené výsledky a nejnižší rozptyl hodnot, ukazující na schopnost nejstabilněji nacházet nízké hodnoty cílové funkce.

Úprava provedená na algoritmu diferenciální evoluce s mutační strategií rand/1 pak vedla k výraznému zlepšení rozptylu nalezených hodnot (zhruba o 50% původní hodnoty). To znamená mnohem lepší schopnost nacházet nízké hodnoty a vyhýbat se lokálním extrémům.

Testy modifikovaného algoritmu ukázali jak funkčnost napříč geometriemi tak správnou volbu vah jednotlivých složek cílové funkce kdy žádný z posuzovaných parametrů výrazně kvalitativně nezaostává za ostatními.

Práce také předkládá vizualizaci pro lepší pochopení zkoumaného problému a ukazuje dynamiku celého systému. Z vizualizace je také patrná silná multimodálnost problému i vzájemná závislost nastavitelných parametrů.

Výsledky této práce poslouží k vylepšení již několikrát zmiňovaného komerčního balíku simulačních aplikací Virtual Extrusion Laboratory.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] CRAWFORD, R. J. *Plastics engineering*. 3rd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1998. ISBN 0-7506-3764-1.
- [2] MICHAELI, Walter, Christian HOPMANN. *Extrusion dies for plastics and rubber*. 4th Edition. Cincinnati: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-623-1.
- [3] RAUWENDAAL, Chris. *Polymer extrusion*. 5th edition. Cincinnati: Hanser Publication, 2014. ISBN 978-1-56990-516-6.
- [4] SAMMUT, Claude. *Encyclopedia of machine learning and data mining*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-1-4899-7685-7.
- [5] PRICE, Kenneth V., Rainer M. STORN a Jouni A. LAMPINEN. *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. New York: Springer, 2005. ISBN 978-3-540-20950-8.
- [6] KRAMER, Oliver. *Genetic algorithm essentials*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-52155-8.
- [7] EvA2 a Java™ based framework for Evolutionary Algorithms. *Universität Tübingen* [online]. Germany: Universität Tübingen, 2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/software/eva2/index.html>
- [8] KRAMER, Oliver. *A Brief Introduction to Continuous Evolutionary Optimization*. Aufl. 2014. Cham: Springer International Publishing, 2014. ISBN 9783319034225.
- [9] Guohua Wu, Xin Shen, Haifeng Li, Huangke Chen, Anping Lin, P.N. Suganthan. *Ensemble of differential evolution variants*, Information Sciences, Volume 423, 2018, Pages 172-186, ISSN 0020-0255
- [10] STROUSTRUP, Bjarne. *The C++ programming language*. Fourth edition. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2013. ISBN 978-0321563842.
- [11] WOLFRAM, Stephen. *The Mathematica book*. 5. ed. Champaign, Ill: Wolfram Media, 2003. ISBN 1579550223.

- [12] VIKTORIN, Adam, PLUHACEK, Michal, SENKERIK, Roman. *Multi-chaotic system induced success-history based adaptive differential evolution*, International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing. Springer, Cham, 2016. p. 517-527.
- [13] J. Kennedy, R. Eberhart, *Particle swarm optimization*, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, pp. 1942–1948.
- [14] Y. Shi, R. Eberhart, *A modified particle swarm optimizer*, Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 1998, pp. 69–73. I. S.



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

DE	Diferenciální evoluce
GA	Genetický algoritmus
PSO	Particle swarm optimization
EA	Evoluční algoritmy
VEL	Virtual Extrusion Laboratory
CAE	Computer-aided engineering

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schematické znázornění vytlačovacího stroje s jedním šnekem [1] .....	11
Obr. 2. Jádru spirálové vytlačovací hlavy.....	12
Obr. 3. Řez tělem vytlačovací hlavy [3] .....	13
Obr. 4. Spirála vytlačovací hlavy rozprostřená v rovině [3].....	14
Obr. 5. Vizualizace změny tlaku ve vytlačovací hlavě pomocí modulu Spiral Die ...	15
Obr. 6. Hlavní generační smyčka evolučních algoritmů [6].....	18
Obr. 7. Jednobodové křížení [6] .....	19
Obr. 8. Ilustrace výpočtu mutačního vektoru $v_{i,g}$ [5].....	21
Obr. 9. Ilustrace výpočtu zkušební vektoru a jeho variant $u_{ig} - u_{ig}''$ [5].....	22
Obr. 10. Řez tokovým kanálem vytlačovací hlavy .....	31
Obr. 11. Řez tokovým kanálem vytlačovací hlavy .....	32
Obr. 12. Řez tokovým kanálem vytlačovací hlavy .....	33
Obr. 13. Barevné schéma hodnot cílové funkce .....	34
Obr. 14. Počáteční mezera 0 mm    Obr. 15. Počáteční mezera 0,34 mm.....	35
Obr. 16. Počáteční mezera 0,68 mm    Obr. 17. Počáteční mezera 1,02 mm.....	35
Obr. 18. Výstupní mezera 0,5 mm    Obr. 19. Výstupní mezera 0,82 mm .....	36
Obr. 20. Výstupní mezera 1,13 mm    Obr. 21. Výstupní mezera 1,45 mm .....	36
Obr. 22. Hloubka kanálu 9,26 mm    Obr. 23. Hloubka kanálu 18,02 mm .....	37
Obr. 24. Hloubka kanálu 23,87 mm    Obr. 25. Hloubka kanálu 32,63 mm.....	37
Obr. 26. Poloměr kanálu 1,96 mm    Obr. 27. Poloměr kanálu 3,01 mm .....	38
Obr. 28. Poloměr kanálu 4,07 mm    Obr. 29. Poloměr kanálu 5,33 mm .....	38
Obr. 30. Konvergenční křivky testovaných algoritmů .....	40
Obr. 31. Průběh testu DE rand/1 .....	42
Obr. 32. Srovnání upraveného algoritmu s předchozími testy .....	43
Obr. 33. Konvergenční křivka jednoho z testů modifikovaného algoritmu .....	44
Obr. 34. Konvergenční křivka jednoho z testů modifikovaného algoritmu .....	45
Obr. 35. Průběh průměrné hodnoty parametru F .....	46
Obr. 36. Průběh průměrné hodnoty parametru Cr .....	46
Obr. 37. Průběh klouzavého průměru parametru F .....	47
Obr. 38. Průběh klouzavého průměru parametru Cr.....	47
Obr. 39. Smykové napětí uvnitř spirálového kanálu .....	48
Obr. 40. Rychlost uvolňování materiálu ze spirálového kanálu .....	48

---

Obr. 41. Objemový průtok na výstupu hlavy.....	49
Obr. 42. Smykové napětí uvnitř spirálového kanálu .....	49
Obr. 43. Rychlost uvolňování materiálu ze spirálového kanálu .....	50
Obr. 44. Objemový průtok na výstupu hlavy.....	50
Obr. 45. Smykové napětí uvnitř spirálového kanálu .....	51
Obr. 46. Rychlost uvolňování materiálu ze spirálového kanálu .....	51
Obr. 47. Objemový průtok na výstupu hlavy.....	51
Obr. 48. Smykové napětí uvnitř spirálového kanálu .....	52

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Statistické parametry nalezených hodnot cílové funkce.....40

Tab. 2. Srovnání statistických parametrů.....44

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: CD-ROM

## **PŘÍLOHA P I: CD-ROM**

Obsahuje diplomovou práci ve formátu PDF a zdrojové kódy uvedené v textu práce