

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2021

**KUBICA
JIŘÍ**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV ŘÍZENÍ A EKONOMIKY PODNIKU



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Nástroj pro nákladovou optimalizaci obráběcího procesu

Cost optimization tool for machining process

AUTOR: Ing. Jiří Kubica

STUDIJNÍ PROGRAM: Strojní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Miroslav Žilka Ph.D.

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Kubica	Jméno: Jiří	Osobní číslo: 438349
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav řízení a ekonomiky podniku		
Studijní program:	Strojní inženýrství		
Studijní obor:	Řízení a ekonomika podniku		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Nástroj pro nákladovou optimalizaci obráběcího procesu

Název diplomové práce anglicky:

Cost optimization tool for machining process

Pokyny pro vypracování:

Úvod – definice cíle, úkolů práce
Teoretická část – obráběcí proces a jeho klíčové parametry, ekonomika obráběcího procesu, rešerše existujících řešení, optimalizační algoritmy, dostupné platformy pro tvorbu nástroje
Praktická část – implementace nákladového modelu, tvorba nástroje pro optimalizaci obráběcího procesu, návrh a tvorba uživatelského rozhraní, metodický popis pro práci s nástrojem, demonstrace na laboratorní úloze
Závěr – zhodnocení, budoucí práce

Seznam doporučené literatury:

MATISKOVÁ, Darina a L'ubomír AMBRIŠKO. Optimization of Cutting Conditions and Improvement of Production in Economic Terms. TEM Journal. 2017, 2017(3), 7. ISSN 2217-8309. Dostupné z: doi:10.18421/TEM63-21
MÁDL, Jan. Optimalizace obráběcího procesu. 1. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-001864-6.
LEE, Yubin, Alin RESIGA, Sung YI a Chien WERN. The Optimization of Machining Parameters for Milling Operations by Using the Nelder–Mead Simplex Method. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020, 4(3). ISSN 2504-4494. Dostupné z: doi:10.3390/jmmp4030066
G. van Rossum, Python tutorial, Technical Report CS-R9526, Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), Amsterdam, May 1995.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D., ústav řízení a ekonomiky podniku FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **23.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **28.02.2022**

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s pomocí vedoucího práce Ing. Miroslava Žilky Ph.D. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako spoluautor.

V Praze dne

Podpis

Poděkování:

Děkuji Ing. Miroslavu Žilkovi Ph.D. za jeho konzultace, rady a podněty, které mi během vypracování této práce poskytl.

Děkuji své manželce, rodině a přátelům za stále trvající podporu během celého studia.

Anotační list

Jméno autora: Ing. Kubica Jiří

Fakulta: Fakulta strojní

Zadávací ústav: Ústav řízení a ekonomiky podniku

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Řízení a ekonomika podniku

Rok: 2021

Název diplomové práce: Nástroj pro nákladovou optimalizaci obráběcího procesu

Název diplomové práce anglicky: Cost optimization tool for machining process

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.

Bibliografické údaje:	počet stran	98
	počet obrázků	42
	počet tabulek	4

Klíčová slova: optimalizace obráběcího procesu, nákladová optimalizace, nákladový model obráběcího procesu, model trvanlivosti nástroje

Keywords: Machining process optimization, Cost optimization, Machining process cost model, Tool durability model

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem nástroje pro nákladovou optimalizaci obráběcího procesu z hlediska rezných podmínek. Zvláštní pozornost je věnována technologii soustružení. Součástí práce je mimo jiné rešerše existujících nástrojů nákladové optimalizace a rešerše optimalizačních algoritmů. V praktické části jsou odvozeny nové vztahy pro výpočet strojního času z obráběného objemu a vztah pro výpočet trvanlivosti nástroje při nekonstantní rezné rychlosti. Práce popisuje jednotlivé moduly a funkce navrženého nástroje nejen po technické stránce, ale především poskytuje návodný přehled uživatelských možností a ovládání systému pro uživatele. V závěru práce je navržený nástroj použit v modelovém příkladu.

Abstract

This thesis deals with the design of a cost optimization tool for a machining process. Special attention is paid to turning technology. The work contains a research of existing cost optimization tools and a research of suitable optimization algorithms. In the practical part of the thesis, new equations are derived for the calculation of machine time from the machined volume and equation for tool durability under variable cutting speed condition is introduced. The work describes the individual modules and functions of the designed tool from the technical point of view and provides the overview of the options and settings for the end user. At the end of the work, the designed tool is also tested.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Průřez třísky při soustružení [7]	13
Obrázek 2.2: Válcové a čelní frézování [8]	14
Obrázek 2.3: Frézování sousledné a nesousledné [9]	14
Obrázek 2.4: Průběh tloušťky třísky při frézování [7].....	15
Obrázek 2.5: Závislost opotřebení na teplotě a řezných podmínkách [12]	17
Obrázek 2.6: Opotřebení soustružnického nože [7].....	18
Obrázek 2.7: Časový průběh opotřebení nástroje [13]	18
Obrázek 2.8: Závislost nákladů na řezné rychlosti [16]	22
Obrázek 4.1: Ukázka programu CustomPart.net [18].....	27
Obrázek 4.2: Ukázka programu Costimator [19].....	28
Obrázek 4.3: Ukázka programu MC2 [20]	29
Obrázek 5.1: Mechanismus zrcadlení Nelder-Meadovy metody [27].....	36
Obrázek 5.2: Mechanismus expanze Nelder-Meadovy metody [27]	37
Obrázek 5.3: Mechanismus vnější kontrakce Nelder-Meadovy metody [27]	38
Obrázek 5.4: Mechanismus vnitřní kontrakce Nelder-Meadovy metody [27]	38
Obrázek 5.5: Mechanismus zmenšení Nelder-Meadovy metody [27]	39
Obrázek 5.6: Rosenbrockova metoda [29]	41
Obrázek 7.1: Schéma hoblování [31]	47
Obrázek 7.2: Definování operace soustružení	51
Obrázek 7.3: Rozdělení obráběného obrazce na trojúhelníky	52
Obrázek 7.4: Rozdělení obráběného obrazce na 2 části	55
Obrázek 7.5: Průběh šířky odebírané vrstvy z trojúhelníkové části obráběné plochy.....	60
Obrázek 7.6: Transformace trojúhelníku	61
Obrázek 8.1: Diagram datových toků	74
Obrázek 9.1: Program AMCO	76
Obrázek 9.2: Sekce 'vstupní data' programu AMCO.....	77
Obrázek 9.3: Záložka 'stroj'	78
Obrázek 9.4: Záložka 'nástroj'	79
Obrázek 9.5: Záložka 'pracovník'	80
Obrázek 9.6: Záložka 'proces' a editor soustružené plochy	81
Obrázek 9.7: Záložka 'podnik'	81
Obrázek 9.8: Sekce 'Nastavení optimalizace'	82
Obrázek 9.9: Sekce 'Výsledky'	83
Obrázek 9.10: Ukázka grafu závislosti nákladů na řezné rychlosti	83
Obrázek 9.11: Ukázka tornádo diagramu	84
Obrázek 9.12: Výběr konfigurací pro porovnání.....	84
Obrázek 9.13: Ukázka grafu skladby nákladů	85
Obrázek 9.14: Ukázka tabulkového srovnání výsledků před a po optimalizaci	85
Obrázek 10.1: Výsledky optimalizace modelového příkladu	88
Obrázek 10.2: Výsledky optimalizace řezné rychlosti modelového příkladu	89
Obrázek 10.3: Skladba nákladů optimalizovaných konfigurací a výchozího nastavení.....	89
Obrázek 10.4: Tornádo diagram po optimalizaci řezné rychlosti.....	90

Seznam tabulek

Tabulka 7.1: Výsledky experimentálního důkazu odvozeného vztahu pro trvanlivost nástroje	65
Tabulka 7.2: Časový fond podle směnnosti provozu.....	71
Tabulka 10.1: Vstupní data modelového příkladu.....	87
Tabulka 10.2: Výsledky optimalizace modelového příkladu	88

Obsah

1	Úvod	10
2	Obrábění	11
2.1	Optimalizace obráběcího procesu	11
2.2	Druhy obrábění	11
2.3	Třískové obrábění nástrojem s definovanou geometrií.....	12
2.3.1	Soustružení.....	12
2.3.2	Frézování	13
2.3.3	Další metody	15
2.4	Nástroj.....	16
2.4.1	Monolitní nástroje.....	16
2.4.2	Nástroje s břitovými destičkami	16
2.4.3	Opotřebení nástroje.....	16
2.4.4	Časový průběh opotřebení	18
2.4.5	Trvanlivost nástroje	19
2.5	Ekonomika obráběcího procesu	19
3	Kalkulační metody.....	23
3.1	Přirážková kalkulace.....	23
3.2	Kalkulace variabilních nákladů (variabilní kalkulace)	24
3.3	Kalkulace podle aktivit	24
4	Existující nástroje pro optimalizaci nákladů obrábění	26
4.1	CustomPart.net.....	26
4.2	Costimator.....	27
4.3	Machining Cost Calculator MC2	28
5	Optimalizační algoritmy	30
5.1	Omezující podmínky.....	30
5.2	Globální vs lokální optimalizace	32
5.3	Globální optimalizace	32
5.3.1	Metoda simulovaného žíhání	32
5.3.2	„Tabu“ prohledávání.....	33
5.3.3	Evoluční algoritmy	33
5.3.4	Optimalizace hejnem částic	34
5.4	Lokální optimalizace.....	34
5.4.1	Gradientní metody	34
5.4.2	Negradientní metody.....	36
6	Výběr koncepce řešení	43
6.1	Vývojové prostředí	43
6.2	Způsob stanovení nákladů	44
6.3	Optimalizační metoda	44
7	Model obráběcího procesu	46
7.1	Skladba časů	46
7.1.1	Čas řezu t_{AScut}	46
7.1.2	Strojní čas t_{AS}	46
7.1.3	Čas přejezdů $t_{transfer}$	48
7.1.4	Neproduktivní čas t_i	48
7.1.5	Čas operace t_o	49
7.2	Obecný proces.....	49

7.3	Soustružení.....	50
7.3.1	Soustružení za stálé řezné rychlosti	52
7.3.2	Soustružení za stálých otáček	54
7.3.3	Soustružení přechodné	54
7.4	Náklady na nástroj	57
7.4.1	Trvanlivost nástroje	57
7.4.2	Důkaz experimentem	65
7.4.3	Náklady na trvanlivost	66
7.4.4	Náklady na operaci	67
7.4.5	Hodinová nákladová sazba	67
7.5	Náklady stroje	67
7.5.1	Variabilní náklady stroje.....	68
7.5.2	Fixní náklady stroje	69
7.5.3	Kapacita strojního zařízení	71
7.5.4	Hodinová nákladová sazba	71
7.5.5	Náklady na operaci	72
7.6	Náklady na obsluhu	72
7.7	Režijní náklady	73
8	Analýza vnitřní struktury programu	74
9	Grafické uživatelské rozhraní (GUI)	76
9.1	Základní popis GUI	76
9.2	Vstupní data	77
9.2.1	Stroj.....	78
9.2.2	Nástroj.....	79
9.2.3	Pracovník	80
9.2.4	Proces.....	80
9.2.5	Podnik	81
9.3	Nastavení optimalizace	81
9.4	Výsledky	83
9.5	Srovnání	85
10	Demonstrace na modelovém příkladě.....	86
10.1	Určení výchozí hodnoty koeficientů Taylorova vztahu	86
10.2	Vstupní data	87
11	Závěr	91
11.1	Budoucí práce.....	91

1 Úvod

V dnešním globalizovaném světě je udržení konkurenční výhody těžší než kdy dříve. Sdílení poznatků a technologií a rostoucí poptávka po spotřebním zboží přispívají ke vzniku velkého množství podniků snažících se vyplnit jakoukoli mezeru na trhu. I když cena výrobku nemusí vždy být hlavní konkurenční výhodou, v hustém kompetitivním prostředí vzniká tlak na snížení spotřebitelských cen. Především malé a střední podniky však obvykle nemohou jít s cenami tak nízko a musí velkým gigantům konkurovat především kvalitou a individuálním přístupem k zákazníkovi. Tato nerovnováha je zapříčiněna jednak nízkými výrobními náklady velkých podniků při hromadných a sériových výrobcích, ale také často nezvládnutým a neoptimálním řízením nákladů v menších podnicích. Menší podniky často nedisponují potřebným know-how nebo finančními zdroji pro provedení racionalizace výrobních procesů a systémů.

Cílem této práce je návrh softwarového nástroje, který poskytne uživateli větší vhled do problematiky nákladové skladby obráběcích procesů a navrhne optimální řezné podmínky pro minimalizaci nákladů. Minimalizace nákladů nemusí nutně odpovídat maximalizaci zisku, zvláště pokud podnik disponuje omezenými zdroji a je nucen odmítat některé zakázky. Z tohoto důvodu je nutné považovat vzniklý nástroj za pomůcku při rozhodovacím procesu, a nikoliv za závaznou a hotovou strategii výroby.

Technologií obráběcích procesů je celá řada a vytvářet nákladový model pro každou z nich by byl velice rozsáhlý úkol. Navržený program cílí na užší skupinu příbuzných technologií, které se snaží popsat do dostatečné hloubky. Speciální pozornost je věnována technologii soustružení.

2 Obrábění

Pokusy o pochopení a popsání fyzikálního principu obrábění sahají až do počátku 19. století. První modely obráběcího procesu uvažovaly pouze ortogonální řezy, tedy takové, při kterých je čelo nástroje kolmé na vektor řezné rychlosti. Tyto modely byly využívány pro odhad napětí deformace a teploty v místě řezu. Brzy byly modely rozšířeny i na další běžně používané obráběcí nástroje, které nemají pravý úhel mezi čelem a vektorem rychlosti. V 90. letech 20. století se ujal empirický přístup modelování obráběcího procesu. Potřeba většího počtu dat, které bylo nutno získat pro sestavení modelu, byla vyvážena jeho dobrou přesností a jednoduchostí. Navíc si model zachovával podobnou přesnost napříč širokým spektrem kombinací řezných podmínek. [1]

Další metody modelování obráběcích procesů, jako například teorie pole skluzu [2] nebo výpočet roviny stříhu [3], vykazují menší přesnost při aplikaci na reálné problémy oproti modelům empirickým. Metoda konečných prvků je schopna modelovat proces s dostatečnou přesností, silně ovšem závisí na správném určení modelu materiálu a jeho mechanických vlastnostech. Výpočetní výkon potřebný pro metody MKP není v dnešní době překážkou.

2.1 Optimalizace obráběcího procesu

Časové využití obráběcích strojů se při konvenčním obrábění pohybuje mezi 6 a 10 % jejich teoreticky možné kapacity [1]. Odhadované optimum z hlediska maximalizace zisku leží v rozmezí 65 a 80 % využití stroje při obrábění na počítačem řízeném stroji [4]. Průzkum organizace CIRP (International Institution for Production Engineering Research) ukázal, že více než 50 % strojírenských firem z USA používá neoptimální nástroj pro dané operace, jen 58 % nástrojů je provozováno při správných řezných podmínkách a 38 % nástrojů není využíváno do konce jejich celé trvanlivosti [5]. Jak se ukázalo, trendem je provozování nástrojů při menších řezných rychlostech, čímž dojde k navýšení jejich trvanlivosti, ale poklesu celkové ziskovosti procesu [5]. Pravděpodobnou příčinou je nevyužívání prediktivních a optimalizačních modelů. V dnešní době, kdy jsou počítače rozšířenější než kdy dříve, využívá stále více firem sofistikovanější nástroje pro plánování a optimalizaci výrobních procesů.

2.2 Druhy obrábění

Jelikož druhů obrábění existuje celá řada, je vhodné nejrozšířenější z těchto druhů popsat. Na základě podobností mezi vybranými procesy, bude navržen matematický model, který co nejlépe vystihne co nejširší spektrum obráběcích procesů. Tím se zajistí univerzálnost

navrhovaného řešení a jeho přenositelnost na další druhy obrábění. Obráběcí metody se dělí na metody ruční a metody strojní. Pro účely návrhu optimalizačního programu jsou v práci dále popsány jen metody strojní.

Strojní metody obrábění lze rozdělit například podle následujících hledisek [6]:

- **Metody obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií**

Do této rozšířené skupiny patří soustružení, frézování, vrtání, vystružování, zahlubování, vyvrtávání, obrážení, hoblování atd.

- **Metody obrábění pomocí nástrojů s nedefinovanou geometrií**

Do této skupiny spadá většina dokončovacích metod, jako je broušení, honování, lapování, superfinišování atd.

- **Obráběcí metody nekonvenční**

Mezi nekonvenční metody patří elektroerozivní obrábění, chemické obrábění, obrábění ultrazvukem, obrábění elektronovým paprskem, obrábění vodním paprskem atd.

Jak je vidět, obráběcích metod existuje celá řada. V zájmu udržení rozsahu práce v doporučených mezích bude navržený optimalizační nástroj pracovat s metodami třískového obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií.

2.3 Třískové obrábění nástrojem s definovanou geometrií

Třískové obrábění je definováno tím, že se pomocí břitu nástroje odebírá z obrobku materiál ve formě třísek. Pohyb může vykonávat jak nástroj, tak i obrobek.

2.3.1 Soustružení

Soustružení je jednou z nejrozšířenějších metod třískového obrábění. Při něm je obrobek upnut je do vřetene soustruhu a vykonává rotační pohyb kolem své osy. Nástroj vykonává obvykle jen posuv v rovině procházející osou obrobku. Z definice je jasné, že je soustružení vhodné pro tvorbu rotačně symetrických součástí. Na soustruzích lze obvykle také provádět operace vrtání, vyvrtávání, vystružování, řezání závitů, vroubkování, válečkování, hlazení a některé další. [6]

Při soustružení válcové plochy koná nástroj vůči obrobku pohyb po šroubovici. V případě čelního soustružení se jedná o Archimedovu spirálu. Řezné podmínky soustružení jsou popsány parametry:

- řezná rychlost v_c ,
- posuv na otáčku f_n ,
- hloubka řezu a_p .

Celková řezná rychlost při soustružení válce je dána složením tangenciální rychlosti v_c a axiální rychlostí v_f podle vztahu

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \sqrt{(\pi \cdot D \cdot n)^2 + (f_n \cdot n)^2} \quad (2-1)$$

$$= n \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f_n^2} \quad .$$

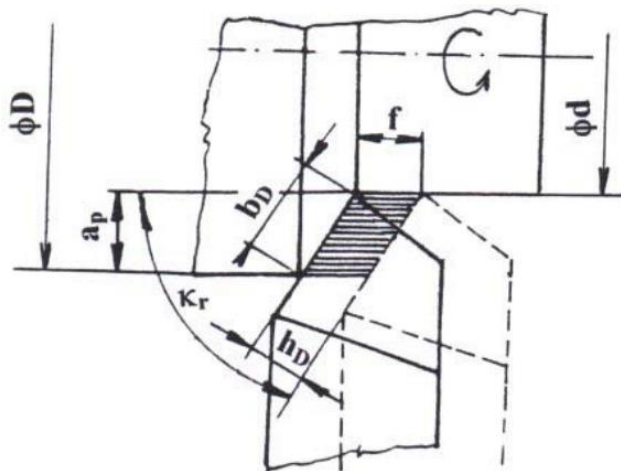
Pro standartní podmínky soustružení platí

$$f_n \ll \pi \cdot D \quad , \quad (2-2)$$

a proto lze i řeznou rychlost aproximovat jako

$$v_e \cong v_c = \pi \cdot D \cdot n \quad . \quad (2-3)$$

Fakt, že lze uvažovat řeznou rychlost jako veličinu nezávislou na posuvu a na hloubce třísky, značně ulehčí odvození matematického modelu soustružení v kapitole 7. [7]



Obrázek 2.1: Průřez třísky při soustružení [7]

Jmenovitý průřez třísky A_D lze vypočítat jako

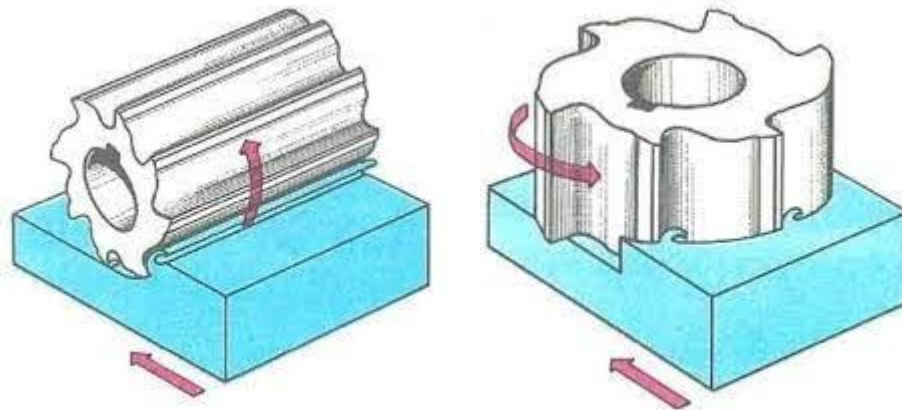
$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f_n \quad , \quad (2-4)$$

kde b_D značí jmenovitou šířku třísky a veličina h_D jmenovitou tloušťku třísky, jak je vidět na obrázku 2.1. [7]

2.3.2 Frézování

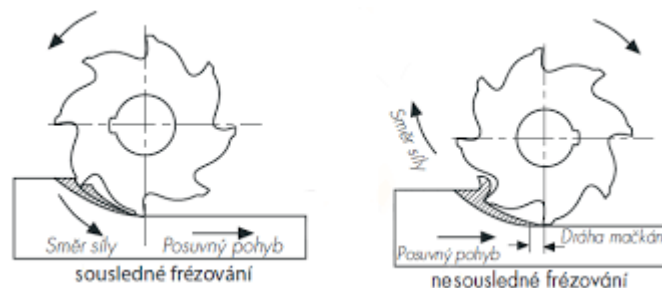
Frézování je metoda, při které je odebírán materiál z obrobku pomocí břitů na rotujícím nástroji. Posuvný pohyb může vykonávat nástroj nebo obrobek. Podle polohy nástroje vůči obrobku lze

rozlišit frézování válcové a frézování čelní (viz obrázek 2.2). Méně časté je frézování okružní nebo frézování planetové. [7]



Obrázek 2.2: Válcové a čelní frézování [8]

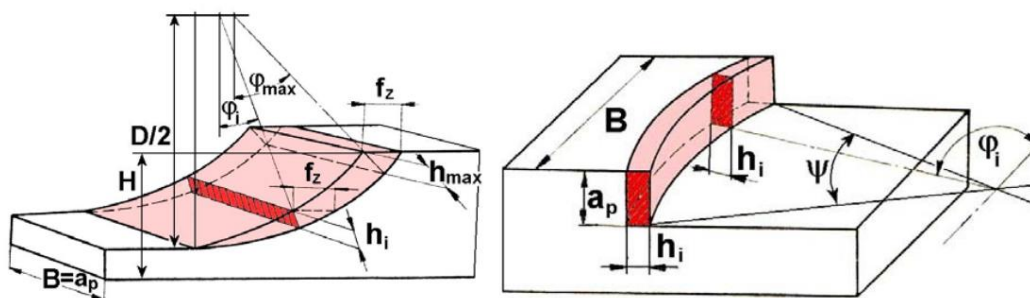
Frézování válcové se uplatňuje především při obrábění rovinných a tvarově méně složitých ploch. Nástroj je vybaven břity pouze na obvodu, nikoli na čele. Podle použité kinematiky lze rozlišit frézování sousledné a nesousledné, jak je vidět na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Frézování sousledné a nesousledné [9]

Čelní frézování oproti tomu využívá i břity na čele nástroje. Z geometrie procesu je patrné, že při čelním frézování dochází jak k souslednému, tak k nesouslednému frézování.

Výhody a nevýhody obou těchto přístupů nejsou z hlediska této práce podstatné. Významný je ovšem rozdílný průběh tloušťky třísky oproti soustružení. Zatímco při soustružení vzniká souvislá tříška relativně neměnného průřezu, při frézování dochází ke vzniku velkého množství malých třísek s proměnnou tloušťkou. Tento jev lze lépe pochopit z obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Průběh tloušťky třísky při frézování [7]

Tloušťku třísky v libovolné části lze vyjádřit jako

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i, \quad (2-5)$$

kde f_z značí posuv na zub frézy. [7]

2.3.3 Další metody

Mezi další rozšířené obráběcí metody patří například [7]:

- **Hoblování**

Jedná se o obrábění jednobřítým nástrojem přímočarým a vratným pohybem. Hlavní pohyb zde vykonává obrobek. Při pracovním zdvihu dochází ke kontaktu obrobku s nástrojem, který jedním obvykle dlouhým pohybem obrobí jednu třísku. Při nepracovním (zpětném) zdvihu je obrobek přesunut do výchozí pozice, tentokrát bez kontaktu s nástrojem. Celý proces se opakuje. I když je nepracovní zdvih rychlejší než zdvih pracovní, dochází k podstatnému poklesu produktivity procesu.

- **Obrázení**

Obrázení je velice podobné metodě hoblování. Hlavní pohyb zde ovšem vykonává nástroj a obrobek je nehybný.

- **Vrtání**

Vrtáním lze zhotovit díry v plném materiálu. Při vrtání je hlavní pohyb rotační a vykonává jej nástroj nebo obrobek. Posuv nástroje do řezu je zpravidla přímočarý.

Další metody obrábění nástrojem s definovanou geometrií opět definují průřez třísky. Pomocí řezné rychlosti a znalosti průřezu třísky lze dospět ke vztahu mezi strojním časem a obráběným objemem. Tento vztah bude s výhodou použit v kapitole 7, kde poslouží jako základní stavební kámen modelu, který lze použít pro větší množství různých technologií bez zásadnějších úprav.

2.4 Nástroj

Z technologického hlediska lze rozlišit nástroje podle použité technologie, tvaru nebo materiálu. Jelikož mají tyto typy nástrojů podobnou nákladovou skladbu, nebude se práce tímto dělením zabývat. Vliv na náklady má ovšem konstrukční zpracování řezných nástrojů. [7]

2.4.1 Monolitní nástroje

Nástroje monolitní neboli celistvé mají řeznou část i tělo nástroje z jednoho kusu materiálu. Tyto nástroje jsou zpravidla levnější, jsou ovšem vhodné pouze pro nižší řezné rychlosti.

2.4.2 Nástroje s břitovými destičkami

Tyto nástroje se skládají z několika částí. Břit nástroje tvoří jedna nebo více břitových destiček, které jsou vyrobeny z kvalitnějších a dražších materiálů než samotné tělo nástroje. Destičky jsou upnuty na tělo nástroje některým z upínacích mechanismů daných normou ISO 504:1975/2014. Výhodou nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami je možnost vyměnit jen řezné destičky a ponechat tělo nástroje pro další cyklus trvanlivosti břitu. Tím lze ušetřit část nákladů spojených s pořízením nástroje i životní prostředí. [10]

Existují i varianty nástrojů s břitovými destičkami, kterou jsou s tělem nástroje spájeny tvrdou pájkou a jsou tudíž nevyměnitelné. Z hlediska nákladů jsou tyto nástroje podobné nástrojům monolitním, proto se jimi práce dále speciálně nezabývá. [7]

2.4.3 Opotřebením nástroje

V místě styku nástroje s obrobkem dochází k plastické deformaci materiálu obrobku za extrémních podmínek (teplota, tlak, rychlost deformace). Tato skutečnost klade vysoké nároky na mechanické a chemické vlastnosti materiálu nástroje konkrétně jeho břitu. Důsledkem působení těchto extrémních vlivů je změna tvaru nástroje a jakosti řezné plochy nástroje. Nejvýznamnější mechanismy opotřebením nástrojů jsou popsány níže. [6][11]

- **Abraze**

Abraze je mechanismus opotřebením nástroje v důsledku mechanického působení malých částic obráběného materiálu, kterou jsou tvrdší než určité složky materiálu nástroje. Díky tomu dochází k obrušování nástroje obráběným materiálem. K abrazi dochází především u nástrojů z rychlořezné oceli nebo slinutých karbidů.

- **Adheze**

Adheze se nejčastěji projevuje vznikem nárůstku mezi čelem nástroje a místem, kde se tvoří tříška. Za nižších teplot se mohou na nástroji tvořit takzvané mikro svary, kvůli kterým část obráběného materiálu ulpí na nástroji. Na míru adheze má největší vliv chemická příbuznost obráběného materiálu a materiálu nástroje a vyskytuje se nejčastěji u uhlíkových a nástrojových ocelí.

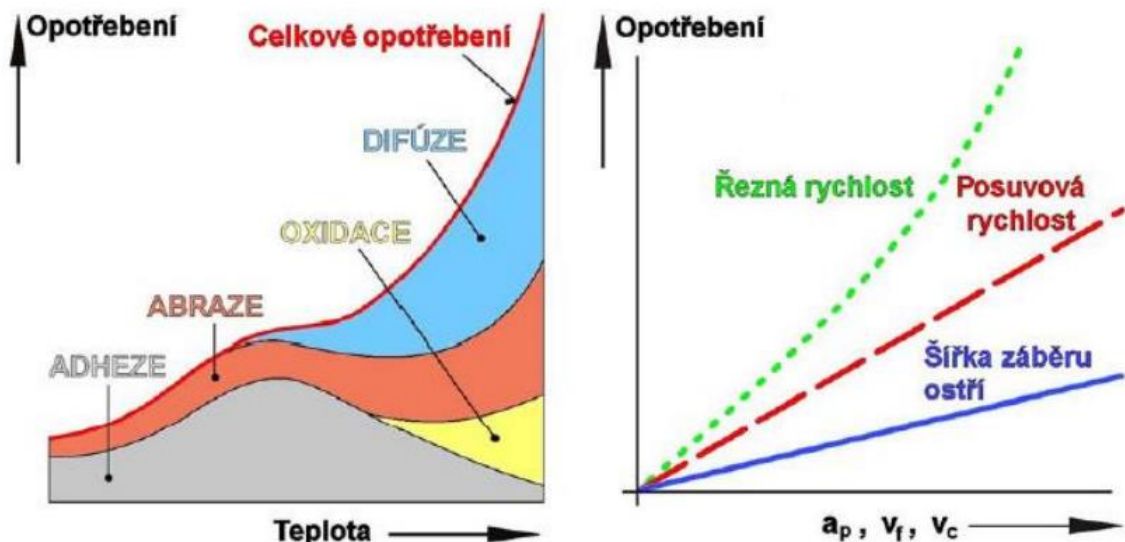
- **Difuze**

Mechanismus difuze umožňuje za zvýšené teploty částicím materiálu obrobku pronikat do materiálu nástroje. Hybnou silou procesu je koncentrace daných částic v obrobku a v materiálu nástroje. Velký vliv na rychlost difuze má především afinita nástroje k materiálu obrobku a také teplota v místě řezu. K difuzi nejčastěji dochází při teplotách překračujících 680 °C při obrábění ocelí slinutým karbidem.

- **Oxidace**

Oxidace je chemický proces vzniku chemických sloučenin působením kyslíku. Díky oxidaci může materiál nástroje měnit své chemické složení a tím se znehodnocovat.

Vliv všech mechanismů opotřebení roste s rostoucí teplotou. Teplota v místě řezu je zase závislá na řezných podmínkách, tedy na řezné rychlosti a velikosti odebírané tříšky.



Obrázek 2.5: Závislost opotřebení na teplotě a řezných podmínkách [12]

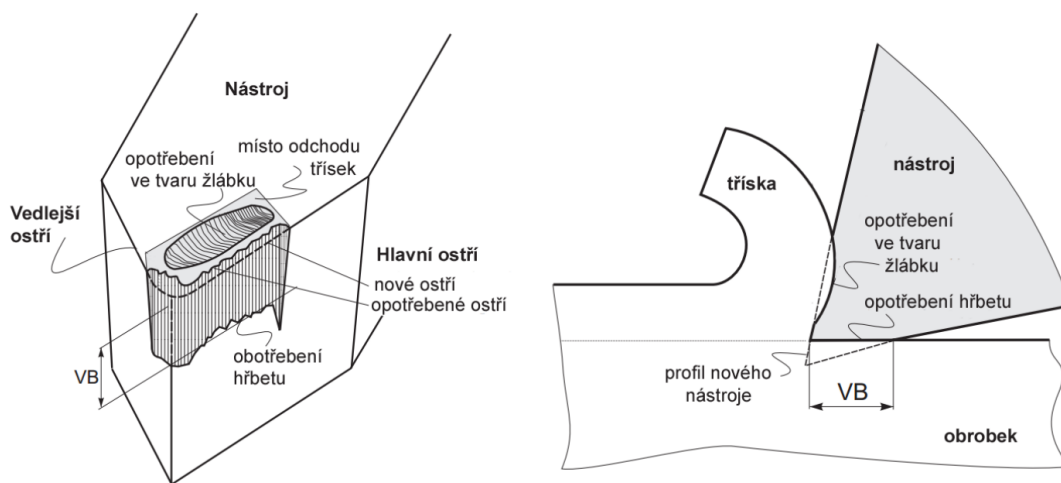
Jak je vidět z obrázku 2.5, míra opotřebení břitů nemusí být na řezných podmínkách závislá lineárně. Vztah pro opotřebení břitů je nejčastěji nutné určit empiricky pomocí řady experimentů. [12]

Samotné opotřebení nástroje může mít mnoho podob. Nejčastěji se jedná o kombinaci následujících forem [12]:

- opotřebení hřbetu,
- žlábkové opotřebení čela nástroje,
- plastická deformace břitu,
- křehký lom břitu.

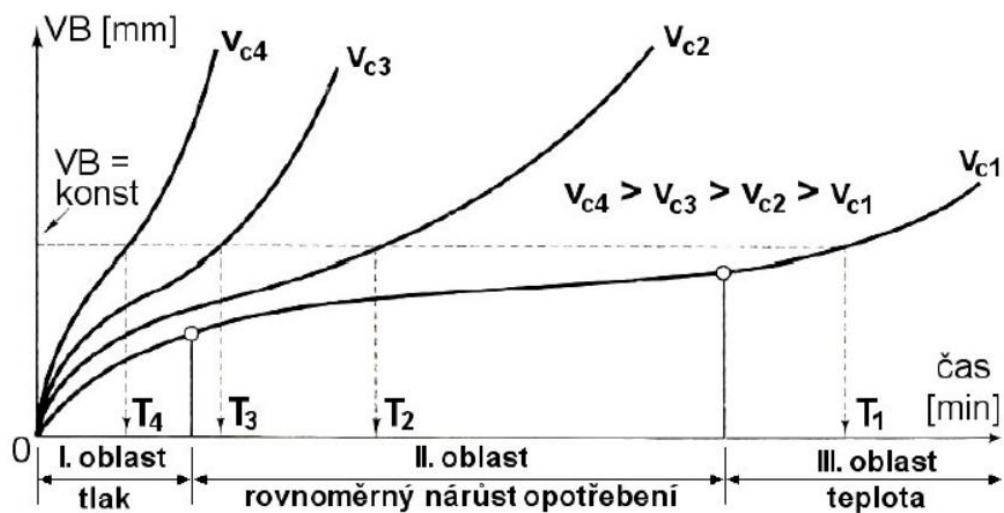
2.4.4 Časový průběh opotřebení

Opotřebení nástroje lze kvantifikovat několika způsoby. Nejčastěji používaná veličina VB značí průměrné opotřebení hřbetu nástroje. Její význam lze lépe pochopit z obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Opotřebení soustružnického nože [7]

Průběh opotřebení nástroje v čase je zachycen na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Časový průběh opotřebení nástroje [13]

Jak je vidět, opotřebení je na čase závislé nelineárně. V první oblasti dochází ke zrychlenému záběhovému opotřebení. Velkou roli zde hrají především mikronerovnosti břitu a čela nástroje

způsobené při výrobě nebo při přeostřování. Vlivem extrémních tlaků a teplot jsou tyto nerovnosti rychle potlačeny a nástroj zaujme tvar, který je optimálnější z hlediska rovnoměrného rozložení řezných sil na větší plochu nástroje. V druhé oblasti dochází téměř k lineárnímu opotřebení nástroje vlivem mechanismů popsanych v kapitole 2.4.3. V této oblasti se nástroj pohybuje po většinu své životnosti. Ve třetí fázi dochází k lavinovitému nárůstu opotřebení. Nástroj již dále není schopen udržet mechanické a chemické vlastnosti potřebné k efektivnímu řezání, což vede ke zhoršené kvalitě řezu, která má za následek ještě větší opotřebování. Pokud není nástroj včas vyměněn, dochází k destrukci nástroje, nejčastěji vlivem lomu. [7][13]

2.4.5 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost je doba, po kterou je nástroj schopen vykonávat předepsanou funkci. Je to časový údaj vyjadřující interval mezi nasazením nástroje do řezného procesu a jeho vyřazením vlivem opotřebení. Pokud lze nástroj po opotřebení znovu opravit – nabrousit nebo otočit břitovou destičku – lze mluvit i o životnosti. Životnost je dána součtem trvanlivostí přes všechny opravné operace, které lze na daném nástroji provést.

Trvanlivost je velice obtížné určit exaktně. V průběhu vývoje modelů obráběcích procesů vznikla celá řada vzorců popisujících trvanlivost v závislosti na řezných podmínkách. Tyto vztahy se vyznačují mocninovou závislostí, která je silně nelineární. Příkladem takového vztahu může být Taylorův vztah [12].

$$T = \frac{C}{v_c^m} \quad (2-6)$$

V praxi se používají vztahy zahrnující i posuv a hloubku řezu. Tento vzorec například udává vztah mezi řeznými podmínkami pro konstantní trvanlivost nástroje.

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad (2-7)$$

Koeficienty a exponenty ze zmíněných rovnic je nutné zjistit experimentálně. Jejich odhady lze nalézt například v [14].

2.5 Ekonomika obráběcího procesu

Pro správné sestavení modelu pro nákladovou optimalizaci je nejprve nutné pochopit jednotlivé složky nákladů obráběcího procesu. Složek nákladů je celá řada, podrobně budou nákladové položky rozebrány v praktické části v kapitole 7. Tato stať klade důraz na pochopení konceptu

nákladového modelu a na určení jeho kritických položek. Zjednodušený model vychází především z [15].

Je nutné vzít v úvahu, že žádný výrobní proces neexistuje sám o sobě. Procesy jsou součástí větších systémů, které s sebou přináší další nákladové položky. Pro dokonalou optimalizaci výroby jako celku z hlediska nákladů by bylo nutné nasbírat data z celého výrobního systému. V reálných podnicích na sebe jednotlivé procesy navazují a doplňují se, stejně tak jako jsou jednotlivá pracoviště, nástroje a další zdroje používány a sdíleny pro vícero různých výrobních procesů.

Pro sestavení koncepčního nákladového modelu obráběcího procesu lze vyjít z předpokladu, že čas, po který je na výrobku vykonávána určitá činnost, je úměrný nákladům spojených s danou činností. Z hlediska nákladů dává smysl rozdělit čas, po který výrobek v procesu setrvává na 3 základní složky.

Vlastnímu strojnímu času, t_{AS} , lze přiřadit nákladovou sazbu x_{AS} , která odpovídá nákladům spojeným s výrobou na daném stroji za jednotku času. Neproduktivní čas t_i představuje čas nutný pro upnutí a vyjmutí obrobku, čas pro přesun výrobku a časy dalších činností, které nepřispívají k tvorbě přidané hodnoty. Neproduktivnímu času t_i je přiřazena nákladová sazba x_i . Čas výměny nástroje t_{ct} udává trvání výměny nástroje, které připadne na 1 vyráběný kus. Pro tento čas tedy platí vztah

$$t_{ct} = T_{ct} \cdot \frac{t_{AS}}{T} , \quad (2-8)$$

kde T_{ct} je doba výměny nástroje, t_{AS} je strojní čas jednoho vyráběného kusu a T je trvanlivost nástroje. Předpokládá se, že během výměny nástroje má nákladová sazba hodnotu x_{ct} .

Všechny zmíněné časy dohromady tvoří přibližně celkový čas pro danou operaci t_o .

$$t_o = t_{AS} + t_i + t_{ct} \quad (2-9)$$

Náklady spojené s těmito časy lze vyjádřit rovnicemi

$$\begin{aligned} C_1 &= x_i \cdot t_i , \\ C_2 &= x_{AS} \cdot t_{AS} , \\ C_3 &= x_{ct} \cdot t_{ct} = x_{ct} \cdot T_{ct} \cdot \frac{t_{AS}}{T} . \end{aligned} \quad (2-10)$$

Pro určení celkových nákladů je do výpočtu nutné zahrnout náklady na nástroj, samozřejmě za předpokladu, že nejsou započítány v nákladové sazbě x_{AS} . Celkové náklady na jeden nástroj na

jeho jednu trvanlivost jsou označeny jako N_t . Náklady na nástroj vztažené na jeden výrobek určit jako

$$C_4 = N_t \cdot \frac{t_{AS}}{T} \quad (2-11)$$

Celkové náklady obráběcího procesu lze jednoduše určit jako součet dílčích nákladových složek.

$$\begin{aligned} C_o &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ &= x_i \cdot t_i + x_{AS} \cdot t_{AS} + x_{ct} \cdot T_{ct} \cdot \frac{t_{AS}}{T} + N_t \cdot \frac{t_{AS}}{T} \end{aligned} \quad (2-12)$$

K pochopení průběhu nákladové funkce v závislosti na řezných podmínkách je vhodné vyjádřit jednotlivé časy v rovnici 2-13 jako funkce stejné proměnné. Z důvodu přehlednosti bude dále jako jediná proměnná uvažována řezná rychlost v_c . Závěry z tohoto odvození jsou ovšem platné i po rozšíření o posuv a hloubku řezu obráběcího procesu.

Čas nečinnosti lze v rámci tohoto zjednodušeného modelu považovat za konstantní. Strojní čas lze přibližně položit do nepřímé úměry k řezné rychlosti, bude tedy platit, že

$$t_{AS} \cong \mu_1 \cdot \frac{1}{v_c} ; \mu_1 = konst. , \quad (2-13)$$

Čas výměny nástroje T_{ct} je opět konstantní, zatímco trvanlivost nástroje závisí na řezné rychlosti podle Taylorova vztahu

$$T \cong \mu_2 \cdot \frac{1}{v_c^m} ; \mu_2 = konst. ; m > 1 \quad (2-14)$$

Dosazením do rovnice 2-13 lze dospět k

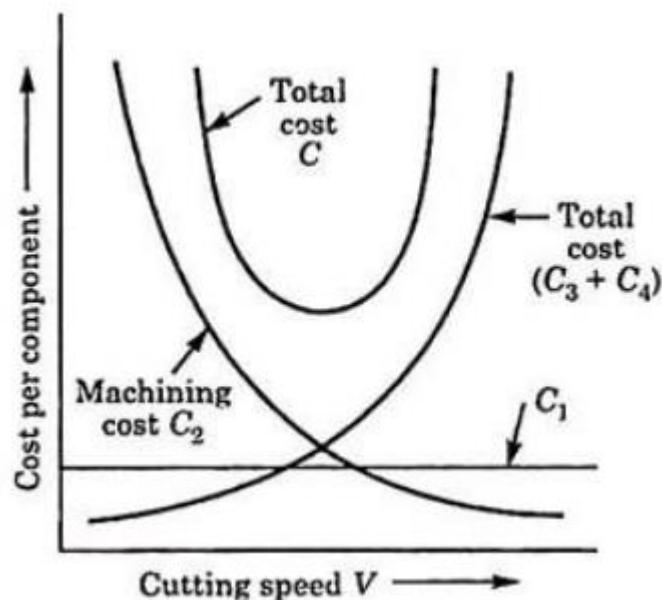
$$C_o = x_i \cdot t_i + x_{AS} \cdot \mu_1 \cdot \frac{1}{v_c} + (x_{ct} \cdot T_{ct} + N_t) \cdot \frac{\mu_1 \cdot v_c^{m-1}}{\mu_2} \quad (2-15)$$

Jak je vidět, celkové náklady obrábění mohou být sníženy zkrácením neproduktivních časů nebo snížením nákladové sazby kterékoli činnosti. Z rovnice 2-13 se mohlo zdát, že náklady lze nadále snižovat zkracováním strojního času t_{AS} . Ze vztahu 2-14 ovšem vyplývá, že snižování strojního času vede k nárůstu řezné rychlosti (nebo k většímu průřezu třísky). Jelikož je na řezné rychlosti závislá i trvanlivost nástroje, není určení optimální řezné rychlosti tak triviální. Díky mocinné podstatě závislosti klesá trvanlivost se zvyšující se řeznou rychlostí progresivně a při vyšších rychlostech tedy rychleji, než klesá hodnota strojního času. Náklady na výměnu

nástroje začínají při extrémnějším řezných podmínkách dominovat nad náklady za strojní práci a k větší úspoře již dalším zvyšováním řezné rychlosti nedojde.

Toto zjištění platí, pokud je exponent m z Taylorova vztahu pro trvanlivost nástroje větší než 1. Podle dostupné literatury [14] jsou standardní hodnoty koeficientu m v intervalu $\langle 2,4; 10 \rangle$. Pokud by v budoucnu byl vyroben nástroj takové kvality, že by jeho trvanlivost závisela na řezné rychlosti slaběji, než tomu je v případě lineární závislosti neboli že by tempo jeho opotřebovávání s rostoucí řeznou rychlostí klesalo, leželo by optimum nákladů teoreticky v nekonečnu, prakticky potom vždy při fyzikálně nejvyšší možné řezné rychlosti. Tato skutečnost by nezávisela na výši pořizovacích nákladů nástroje ani na čase výměny takového nástroje. Je ovšem pravděpodobné, že by klasické a levnější nástroje vykazovaly nižší celkové náklady.

Graficky je průběh nákladů obráběcího procesu znázorněn na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Závislost nákladů na řezné rychlosti [16]

Jak je vidět, celkové náklady C mají konvexní průběh a mají minimum, které lze nalézt pomocí derivace

$$\left. \frac{\partial C}{\partial v_c} \right|_{v_c=v_{opt}} = 0 \quad (2-16)$$

V praxi mohou nastat případy, kdy je řezná rychlost omezena limitacemi strojního zařízení. Minimum zjištěné derivací poté může ležet mimo definiční obor funkce. V takovém případě je nutné hledat optimum i na hranici definičního oboru, což může být při uvažování více

proměnných (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu) na hranici analytické zvládnutelnosti. V kapitole 5 budou proto popsány numerické metody hledání minima funkce.

3 Kalkulační metody

Popis nákladů reálného obráběcího procesu nelze vyjádřit triviálním vztahem, tak jako tomu bylo u zjednodušeného modelu podle rovnice 2-15. Komplexnost a rozsah problému si žádá systematický přístup k vyjadřování jednotlivých nákladových položek. Metodik, jak při sestavování nákladů postupovat, vznikla v průběhu let celá řada.

Důležitým předpokladem použití některé z kalkulačních metod je správné rozdělení a definování nákladů. Náklad je možné chápat jako peněžité ocenění spotřeby zdroje. Z kapacitního hlediska lze rozlišit náklady variabilní a fixní (speciálním případem jsou náklady smíšené). Fixní náklady, jak již název napovídá, představují neměnnou položku z objemu rozsahu výroby, naopak náklady variabilní na objemu výroby závisí. Důležité je i dělení nákladů podle kalkulačního hlediska. Lze rozlišit náklady přímé, které je možné přímo přiřadit dané kalkulační jednici, a náklady nepřímé, které lze přiřadit na základě použití vzorců, které nabízí některé kalkulační metody. Právě přístupem k přiřazování nepřímých nákladů se kalkulační metody nejvíce odlišují. [17]

Nejstarší koncepce kalkulace nákladů je kalkulace úplných nákladů, která kalkulační jednici přiřazuje nejen variabilní ale i fixní náklady. Tato metoda je tedy vhodná například pro odhad ceny zakázek, kvůli způsobu přiřazování fixních nákladů ji ovšem nelze použít na všechny rozhodovací úlohy. Oproti tomu kalkulace neúplných nákladů uvažuje pouze vliv nákladů variabilních, nelze se tedy dopočítat celkové výši nákladů celého systému. Metoda je ovšem vhodnější například pro porovnávání nákladovosti podobných variant. [17]

3.1 Přirážková kalkulace

Přirážková kalkulace je velice jednoduchá a rozšířená metoda výpočtu nákladů. Její nespornou výhodou je potřeba pouze účetních dat, nejsou tedy zapotřebí žádné speciální informace o procesech nebo výrobcích. Metoda tkví ve výpočtu režijní sazby (režijní přirážky, kalkulační sazby) pomocí takzvané rozvrhové (kalkulační) základny. Metoda předpokládá existenci kvantifikovatelné veličiny, přímého nákladu, který je jasně a jednoznačně přiřaditelný dané kalkulační jednici. Metoda na základě této veličiny určí kalkulační sazbu jako

$$\text{Kalkulační sazba} = \frac{\text{Celkový nepřímý (společný) náklad}}{\text{celkový objem kalkulační základny}} \quad (3-1)$$

Danou rozvrhovou základnou jsou často přímé mzdy nebo přímý materiál.

Přřazení nepřímých nákladů poté probíhá na základě součinu kalkulační sazby s velikostí veličiny, který byla zvolena jako kalkulační základna a která připadá na kalkulační jednici. Metoda tedy spoléhá na přímou úměru mezi zvolenou kalkulační základnou a režijními náklady, které jsou dané jednici přiřazeny. Pokud je pro všechny typy režijních nákladů použita stejná rozvrhová základna, jedná se o sumační přírážkovou kalkulaci. V praxi se často stává, že některé režijní náklady nejsou úměrné stejné veličině a je nutné použít různé rozvrhové základny, čímž vzniká diferencovaná přírážková kalkulace. [17]

3.2 Kalkulace variabilních nákladů (variabilní kalkulace)

Kalkulace variabilních nákladů odstraňuje nepříznivé dopady rozpočítávání fixních nákladů na jednotlivé kalkulační jednice. Náklady jsou striktně rozděleny na variabilní a fixní. Nejprve je pro každý výkon spočítán takzvaný příspěvek na úhradu jako rozdíl mezi cenou daného výkonu a jeho variabilními náklady. Fixní náklady se započítávají za podnik jako celek a odečítají se až od sumy příspěvků na úhradu všech výkonů.

Náklady, respektive příspěvky na úhradu, jednotlivých výkonů tedy nejsou závislé na objemu daných výkonů. Metoda neposkytuje informaci o zisku jednotlivých výkonů, může ovšem poskytnout cenné podklady pro řízení hospodárnosti a efektivity daných procesů.

Pokud lze část fixních nákladů osamostatnit od podniku jako celku a přiřadit ji některému z nižších útvarů nebo procesů, lze použít vícestupňovou metodu, která určuje několik úrovní příspěvků na úhradu postupným odečítáním právě těch fixních nákladů, které se podařilo rozpočítat na menší celky.

Metoda je vhodná pro rozhodování o struktuře procesů v menších časových i rozsahových celcích. [17]

3.3 Kalkulace podle aktivit

Metoda ABC (Activity Based Costing) odstraňuje problémy s paušalizací nákladů. Nepoužívá rozvrhovou základnu, která nemusí odpovídat reálnému rozdělení nákladů, místo toho sleduje tok nákladů výrobními procesy a snaží se odhalit jejich pravou příčinu. Náklady jsou tedy přiřazovány výkonům na základě jejich skutečné fyzické aktivity. Náklady jsou na kalkulační

jednice přiřazeny na základě objemu prováděných aktivit na dané jednici, nikoliv na základě objemu produkováných výkonů.

Nepřímé náklady jsou v metodě ABC nejprve přiřazeny dílčím aktivitám na základě podrobné znalosti daného procesu a jeho analýzy. Dále jsou zjištěny celkové náklady aktivit jako součet dílčích složek nepřímých nákladů přiřazených dané aktivitě. Posléze je nutné zjistit míru využití aktivit vyšetřovaným nákladovým objektem, podle které se určí náklady daného objektu.

Výhodou metody ABC je bezesporu její přesnost a přesah do řízení podnikových aktivit. Oproti tradičním metodám je ovšem vyžadována znalost většího množství dat a celá kalkulace je podstatně komplikovanější. [17]

4 Existující nástroje pro optimalizaci nákladů obrábění

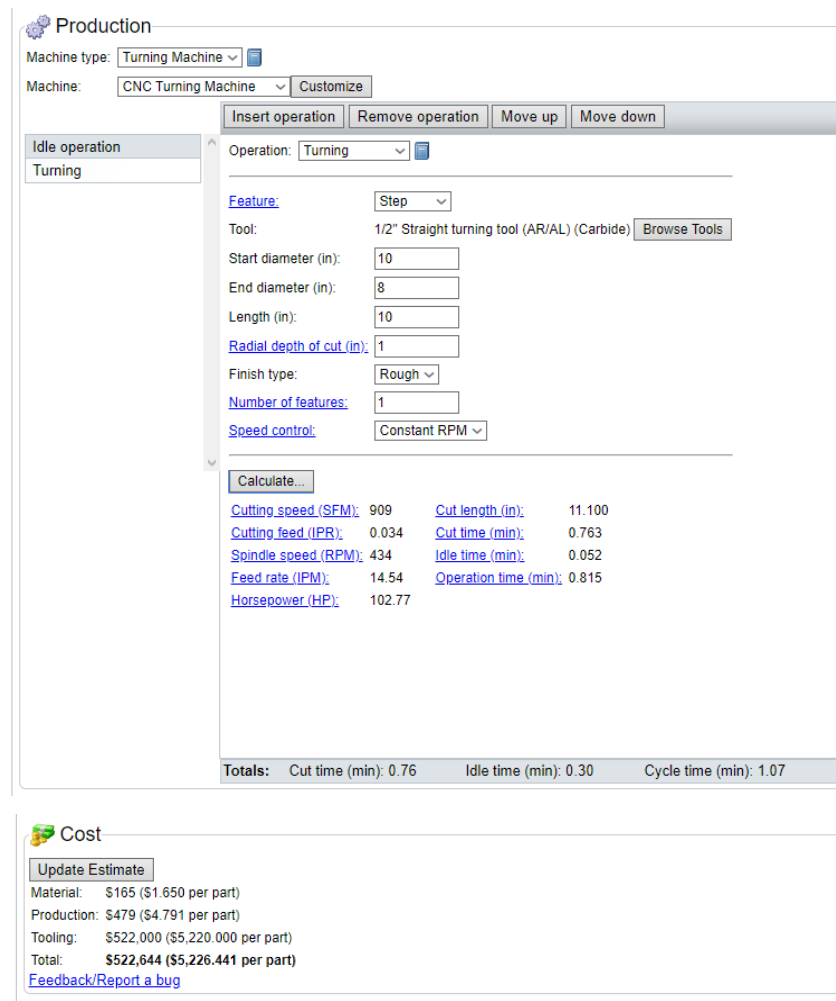
Existuje celá řada nástrojů pro výpočet nákladů obráběcího procesu nebo jeho částečnou optimalizaci. Dostupnost těchto nástrojů je ovšem v nepřímé úměře k jejich kvalitě a rozsahu. Dostupné a dohledatelné nástroje se dají rozdělit do tří kategorií: volně dostupné nástroje vyvinuté entuziasty, komerční nástroje a nástroje vzniklé v akademické sféře jako studentské a doktorské práce. Z každé kategorie byl vybrán jeden zástupce charakterizující možnosti dostupných nástrojů v dané oblasti.

4.1 CustomPart.net

CustomPart.net [18] je volně dostupná internetová databáze obsahující informace o výrobních technologiích. Web má jednak funkci edukativní, je vybaven podrobným popisem celé řady technologií, včetně základních rovnic a jednoduchých kalkulaček významných parametrů těchto procesů.

Na obrázku 4.1 je ukázka kalkulačky nákladů soustružení kulaté tyče. Nastavení kalkulačky je přehledné. V programu lze vybírat z celé řady obráběcích technologií, pro každou z nich obsahuje rozhraní vlastní nastavení parametrů. Jednotlivé operace za sebe lze řetězit a sestavit tak teoreticky výrobní model celého produktu.

Kalkulační nástroj pro výpočet nákladů na lidskou práci nebo třeba kalkulace nákladů na strojní zařízení je ovšem obsažena v samostatných modulech. Jednotlivé moduly mezi sebou nekomunikují a data mezi nimi se musí přenášet ručně. Zjištění celkových nákladů obráběcího procesu, včetně nákladů na obsluhu, stroj, opravy, výměnu nástroje apod., je s nástroji CustomPart.net nepohodlně komplikované.

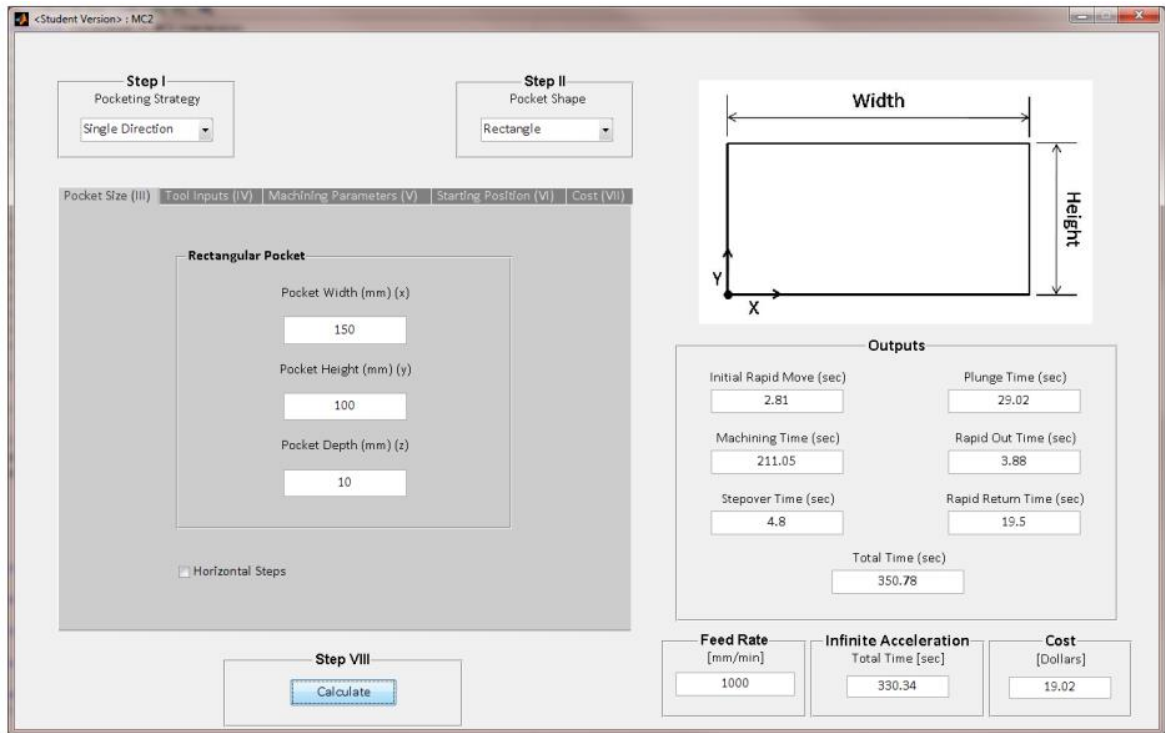


Obrázek 4.1: Ukázka programu CustomPart.net [18]

Kalkulační programy webu také neobsahují žádný optimalizační nástroj. Optimalizace pomocí CustomPart.net by tedy zahrnovala jen porovnávání nákladů definovaných variant. Spousta funkcí a modulů tohoto nástroje je zatím nedostupná. Na webových stránkách CustomPart.net se nelze dopátrat doby vzniku tohoto projektu, stránky jsou ovšem v pravidelných intervalech aktualizovány a dá se předpokládat, že vývoj kalkulačních nástrojů stále pokračuje.

4.2 Costimator

Řešení s názvem Costimator [19] americké společnosti MTI systems je komplexní profesionální řešení pro řízení nákladů výrobních procesů. Společnost MTI systems se od roku 1982 zabývá vývojem softwaru pro určení nákladů v průmyslové výrobě. Jejich produkt dokáže pracovat s 3D CAD modely a podnikovými databázemi. Costimator slouží pro přesné vyčíslení aktuálních nákladů jednotlivých výrobků, odhad výrobních nákladů budoucích projektů a nákladovou optimalizaci.



Obrázek 4.3: Ukázka programu MC2 [20]

Kalkulačka je vytvořena v prostředí Matlab s jednoduchou grafickou nástavbou. Práce přináší zajímavý vhled do problematiky určení optimální trajektorie obráběcího nástroje. Mimo jiné dochází autor k závěru, že neoptimálnějším tvarem pro čelní frézování je spirála nebo alespoň lomená spirála.

K přesnému určení všech nákladů spojených s obráběním program MC2 ovšem nedochází.

5 Optimalizační algoritmy

Optimalizace znamená hledání takové kombinace vstupních parametrů, při které se systém chová optimálně z hlediska zvoleného optimalizačního kritéria. Optimalizační kritérium je nejčastěji dáno matematickým vztahem nebo algoritmem a lze ho tedy pro fixní vstupní parametry vyčíslit. Optimalizační kritérium je zvykem volit tak, aby optimalizace spočívala v hledání extrému funkce, kterou je optimalizační kritérium popsáno. V případě, že není hledané optimum reprezentováno extrémem, ale konkrétní hodnotou, je nutné zvolit optimalizační kritérium nové, které pro žádanou hodnotu původního optimalizačního kritéria nabývá extrému.

Pokud by řešeným problémem byl například návrh řezných podmínek pro žádaný čas operace $t_{\text{žadany}} = 1.5$ min, lze optimalizační kritérium sestavit takto:

$$CF = (t(\vec{x}) - t_{\text{žadany}})^2 . \quad (5-1)$$

Pro optimalizační kritérium je zvykem používat název *cílová funkce* (CF) nebo *účelová funkce* (angl. *fitness function* nebo *loss function*). Neznámá \vec{x} je vektorem vstupních parametrů, na základě kterých optimalizace probíhá. Jak je vidět, funkce CF nabývá svého minima ($CF = 0$), právě když čas $t(\vec{x})$ odpovídá požadovanému času $t_{\text{žadany}}$. Podobnými postupy lze téměř jakýkoli optimalizační problém převést na úlohu hledání extrému funkce.

V případě optimalizace řezných podmínek z hlediska nákladů, bude cílová funkce vypadat takto

$$CF = N(\vec{x}, \vec{p}) ,$$
$$\vec{x} = \begin{bmatrix} v_c \\ a_p \\ f_n \end{bmatrix} , \quad \vec{p} = \begin{bmatrix} \text{cena stroje} \\ \text{doba odepisování} \\ \vdots \end{bmatrix} , \quad (5-2)$$
$$\vec{x}_{opt} = \arg \min_{\vec{x}} (N(\vec{x}, \vec{p})) .$$

5.1 Omezující podmínky

Bylo by nesmyslné předpokládat, že vstupní vektor \vec{x} může nabývat libovolných hodnot. Výsledek optimalizace se často nachází na okraji definičního oboru cílové funkce, a proto je nezbytné brát v úvahu omezenost vstupních parametrů. Vstupní parametry jsou nejčastěji omezeny kvůli [21]:

- povaze dané veličiny – rozměr nemůže být fyzicky záporný, cena výrobku nemůže být záporná atd.;
- fyzikálním zákonům – Nelze překročit rychlost světla, čas běží jen dopředu atd.;
- legislativní požadavky – Požadavek na minimální mzdu, omezení emisí, minimální průřezy vodičů pro dané proudy atd.;
- konstrukční požadavky – Maximální rozměry čerpadla, maximální hmotnost atd.

Téměř všechna tato omezení lze zapsat pomocí nerovnic jako [21]:

$$\vec{x}_L \leq \vec{x} \leq \vec{x}_H \quad , \quad (5-3)$$

kde \vec{x}_L a \vec{x}_H jsou vektory konstant, které udávají spodní, respektive horní mez pro veličiny z vektoru parametrů \vec{x} .

Některé vstupní veličiny nedává smysl omezit fixní hodnotou, ale přesto by měly být omezeny. Například objem válce pístového čerpadla může být omezen objemem nebo hmotností celého čerpadla. V takovém případě se jedná o lineární (ve složitějších případech i o nelineární) omezující podmínky, které lze formulovat jako [21]:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 \cdot \vec{x} &\leq \vec{b}_1 \quad , \\ \mathbf{A}_2 \cdot \vec{x} &= \vec{b}_2 \quad , \\ \mathbf{A}_3 \cdot \vec{x} &\geq \vec{b}_3 \quad . \end{aligned} \quad (5-4)$$

Matice \mathbf{A} obsahují koeficienty lineárních závislostí vstupních parametrů mezi sebou. Vektory \vec{b} se skládají z konstant pravých stran. Matice \mathbf{A} jsou rozměru $m \times n$, kde m je počet lineárních podmínek a n je délka vektoru \vec{x} . Vektory \vec{b} mají stejnou délku jako vektor \vec{x} .

Všechny uvedené omezující podmínky se řadí mezi takzvané tvrdé omezující podmínky, tedy takové podmínky, které musí být splněny bezpodmínečně. V případě, že některý z parametrů není potřeba omezit tvrdě, lze použít měkkou omezující podmínku, která favorizuje hodnotu parametru, která splňuje danou podmínku, ale nevyklučuje výsledek, který leží mimo preferovaný interval. [21]

Tohoto efektu lze dosáhnout, pokud se měkká podmínka přičte k cílové funkci tak, aby nedodržení podmínky nepříznivě ovlivnilo hodnotu cílové funkce. Algoritmus poté bude preferovat hodnoty parametrů, pro které má CF menší (v případě maximalizace naopak větší) hodnotu. Optimální hodnoty vstupních parametrů poté nebudou splňovat měkké omezující podmínky jen tehdy, pokud výhody plynoucí z jejich nedodržení předčí penalizaci za jejich nedodržení přidanou do CF .

5.2 Globální vs lokální optimalizace

Při optimalizačních úlohách často nelze popsat model systému (a tedy ani cílovou funkci) jednoduchou rovnicí nebo soustavou rovnic. V případě, že lze systém analyticky popsat, lze většinou řešit analyticky i optimalizační úlohu pomocí hledání extrému funkce derivacemi. V opačném případě je nutné zvolit některou z mnoha optimalizačních metod, které hledají extrém iterativně v několika krocích. Metody se dělí do dvou hlavních skupin podle toho, zda hledají lokální nebo globální extrém. [23]

5.3 Globální optimalizace

Globální extrém je minimum z lokálních minim nebo maximum z lokálních maxim. Pokud hledání extrému nelze provést analyticky je nalezení globálního extrému více než komplikované. Největším problémem globální optimalizace je vždy přítomná nejistota, že nalezený extrém ve skutečnosti není globální. Skutečné nalezení globálního extrému, by zahrnovalo nalezení všech extrémů lokálních. Pokud není znám tvar cílové funkce, a není tedy znám možný počet lokálních extrémů, například kvůli složitosti a velkému počtu vstupních parametrů řešeného problému, nelze s určitostí tvrdit, že byly nalezeny všechny lokální extrémy, a tudíž že největší z lokálních extrémů je přítomen mezi nalezenými. [24]

Ve většině případů je pravý globální extrém nalezen, a pokud ne, je nutné spokojit se se suboptimálním řešením.

Nejznámější metody globální optimalizace jsou popsány níže.

5.3.1 Metoda simulovaného žíhání

Při simulovaném žíhání jsou vstupní parametry modelu zvoleny nejprve náhodně. V každé další iteraci se vyhodnotí cílová funkce pro několik sousedních stavů systému. Sousední stav systému, je takový stav, při kterém se vstupní vektor změnil jen minimálně. Tato neurčitá definice vede k celé řadě strategií, které slouží k určení vhodných kandidátů na sousedy současného stavu. Poté, co je vyhodnocena cílová funkce pro daného souseda, je nutné rozhodnout, zda bude tento nový stav přijat jako výchozí stav pro další iteraci. Při simulovaném žíhání nezávisí přijetí stavu jen na hodnotě cílové funkce. Používá se stochastický přístup pomocí měnící se pravděpodobnosti přijetí stavu. Pravděpodobnost přijetí nového stavu závisí nejen na hodnotě jeho cílové funkce, ale také na parametru T (teplota). Stejně jako při žíhání, udává teplota schopnost systému se měnit. Při vyšší hodnotě tohoto parametru, je větší pravděpodobnost, že se přijme stav, který má horší hodnotu cílové funkce. Tím se zaručí, že algoritmus neskončí jen v nejbližším lokálním minimu. Parametr teploty se v průběhu

optimalizace zmenšuje. Systém tedy ze začátku dělá velké skoky přes různé oblasti v prostoru daném vstupními veličinami, vybírá oblasti s optimálnější hodnotou cílové funkce a později je již pravděpodobnost velkých skoků mimo právě prohledávanou oblast minimální. Algoritmus se zastaví po určitém počtu iterací, při dané dosažené teplotě nebo při daném počtu neúspěšných pokusů o skok do nového stavu. [24]

5.3.2 „Tabu“ prohledávání

Tato metoda vychází z některé z metod lokální optimalizace, při nalezení optimálního minima je ovšem algoritmus dále schopen přesunout se na souseda s horší hodnotou cílové funkce. Algoritmus je dále vybaven takzvanou tabu tabulkou, která obsahuje místa v prostoru daném vstupními veličinami. Algoritmus při každé iteraci nejprve ověří, že daný sousední stav nebyl již dříve prohledáván. Tím se zaručí, že po nalezení prvního lokálního optima algoritmus prohledává blízké okolí a hledá optima další. Po skončení běhu algoritmu je za globální minimum prohlášeno nejmenší z lokálních minim. [25]

5.3.3 Evoluční algoritmy

Název dostala tato metoda díky podobnosti s procesem přirozené evoluce, z kterého do značné míry čerpá. Celý proces je rozdělen do generací. Každá generace obsahuje fixní počet jedinců, kteří mezi sebou soupeří a jsou řazeni a tříděni podle jejich síly (hodnoty CF). Jedinci jsou představováni kombinací vstupních parametrů. V případě optimalizace je kritériem pro sílu jedince hodnota cílové funkce. Další generace je vytvořena pomocí 3 mechanismů:

- přenesení jedince beze změny do další generace,
- křížení jedinců mezi sebou,
- mutace jedince.

Tyto mechanismy jsou totožné s mechanismy přirozené evoluce. Křížení jedinců spočívá v použití hodnot vstupních parametrů z obou rodičů. Výběr jedinců pro křížení je založen na pravděpodobnosti. Větší šanci mají silnější jedinci. Mutace jedince znamená náhodnou změnu některých jeho vstupních parametrů.

I když je tento způsob obvykle pomalejší než ostatní metody, je velice univerzální a použitelný i pro případy, kdy je samotné sestavení klíčové funkce problematické (neuronové sítě, UI, učící se algoritmy). Vyhodnocení generace je totiž založeno na porovnávání jedinců mezi sebou, což je mnohdy jednodušší než jejich bodování na základě cílových funkcí. [25]

5.3.4 Optimalizace hejnem částic

Tak jako evoluční algoritmy čerpají inspiraci z přírody, tyto algoritmy jsou inspirovány fenoménem hejna ptáků. Stavový prostor je prohledáván najednou hejnem částic, které jsou definovány nejen svou polohou ale i vektorem rychlosti. Každá částice se chová podobně jako pták hledající potravu. Hejno spolu komunikuje a sdílí informace o vhodných lokalitách a nalezených extrémech. Částice nekomunikují se všemi částicemi najednou, ale jen se svým nejbližším okolím. Každá částice si pamatuje nejlepší navštívenou polohu. Globální extrém je poté určen jako optimum ze všech částic. Tak jako u většiny globálních optimalizačních metod je trasa hejna dána pravděpodobností, a proto dva běhy algoritmu na stejné úloze mohou podat jiné výsledky. [24][25]

5.4 Lokální optimalizace

Jak již bylo řečeno dříve, díky tomu, že lokální optimalizace hledá vždy jen nejbližší lokální optimum k daným výchozím podmínkám, je lokální optimalizace zpravidla rychlejší. Převážná část metod pro lokální optimalizace pracuje s deterministickým přístupem, a proto je celý proces optimalizace reprodukovatelný. Dle definice potřebují všechny metody lokální optimalizace výchozí bod – odhad optimální hodnoty – který slouží jako startovní pozice pro první iteraci algoritmu. [22][23]

5.4.1 Gradientní metody

Nejrozšířenější skupinou algoritmů pro lokální optimalizaci jsou gradientní metody, které pracují s parciálními derivacemi vyšetřované funkce v daném bodě. Předpokladem pro úspěšnost těchto metod je tedy existence parciálních derivací. Funkce musí být spojitá a hladká, což není vždy splněno. Výpočet parciálních derivací probíhá numericky. V případě, že lze parciální derivace spočítat analyticky, je zbytečné tyto metody používat.

5.4.1.1 Metoda největšího spádu [26]

Metoda největšího spádu spočívá ve vyhodnocení gradientu vyšetřované funkce v každé iteraci v aktuálně vyšetřovaném bodě. Nový bod pro další iteraci je spočítán podle rovnice

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - \eta \nabla f(\vec{x}_k) \quad . \quad (5-5)$$

Délka kroku η je konstantou v případě, že se jedná o metodu s krátkým krokem. Metoda s dlouhým krokem řeší velikost η jako samostatnou úlohu popsanou vztahem

$$\eta_k = \max \left\{ \eta \left| \frac{d}{d\eta} (\vec{x}_k - \eta \nabla f(\vec{x}_k)) = 0, \eta > 0 \right. \right\} . \quad (5-6)$$

Délka kroku je tedy zvolena tak, aby nový bod byl právě nejnižším místem na polopřímce dané záporným vektorem gradientu. Toto vylepšení a potenciální zrychlení hledání optima může vést k nestabilitě optimalizačního procesu.

5.4.1.2 Metoda sdružených gradientů [26]

Na rozdíl od metody největšího spádu je metoda sdružených gradientů vhodnější pro funkce s dlouhými pomalu klesajícími údolími, u kterých může jinak dojít k nežádoucímu kmitání iterací mezi svahy údolí. Tato metoda pro vyhodnocení směru k získání dalšího bodu používá nejen gradient v aktuálním ale i v minulých vyšetřovaných bodech. Díky tomu není algoritmus schopen okamžitě reagovat na náhlou změnu směru gradientu, zároveň však roste jeho stabilita. Výpočet dalšího bodu je poté dán rovnicemi

$$\begin{aligned} \vec{x}_{k+1} &= \vec{x}_k - \eta_k \mathbf{d}_k , \\ \mathbf{d}_k &= -\nabla f(\vec{x}_k) + \left(\frac{\|\nabla f(\vec{x}_k)\|}{\|\nabla f(\vec{x}_{k-1})\|} \right)^2 \mathbf{d}_{k-1}, \\ \mathbf{d}_0 &= -\nabla f(\vec{x}_k) . \end{aligned} \quad (5-7)$$

5.4.1.3 Newtonova metoda [25][26]

Newtonova iterační metoda neboli metoda tečen, je jedna z nejstarších metod iterativního způsobu řešení rovnic. Její n-dimenzionální zobecnění lze popsat vztahem

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - \mathbf{J}(\vec{x}_k)^{-1} f(\vec{x}_k) . \quad (5-8)$$

V tomto tvaru ovšem řeší metoda rovnici

$$f(\vec{x}_k) = 0 . \quad (5-9)$$

Optimalizační problém ovšem spočívá v hledání extrému, proto je nutné vycházet z rovnice

$$\nabla f(\vec{x}_k) = 0 . \quad (5-10)$$

Tvar Newtonovy metody přejde v

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - [\mathbf{H}f(\vec{x}_k)]^{-1} \nabla f(\vec{x}_k) , \quad (5-11)$$

matice $\mathbf{H}f(\vec{x}_k)$ je takzvaná Hessova matice, tedy matice druhých derivací vyšetřované funkce podle všech dvojic vstupních veličin z vektoru \mathbf{x} .

5.4.2 Negradientní metody

Výhodou negradientních metod je jejich větší univerzálnost. Všechny negradientní metody zpřesňují své řešení na základě vyčíslení hodnoty vyšetřované funkce v několika sousedních bodech k právě vyšetřovanému bodu.

5.4.2.1 Nelder-Meadova simplexová metoda [26] [27]

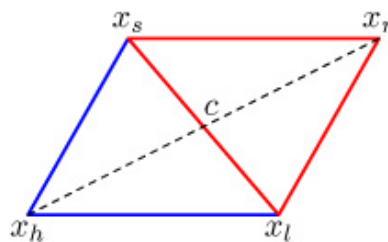
Nelder-Meadova simplexová metoda je jednou z nerozšířenějších negradientních metod lokální optimalizace. Simplex je v pojetí Nelder-Meada polytop o $n+1$ vrcholech v n -rozměrném prostoru (n -rozměrná verze trojúhelníku). Použitý polytop je obvykle volen jako pravidelný. V současné době existuje celá řada variant toho algoritmu, které se liší v drobných detailech. Podstata metody tkví v následujících krocích:

1. Vygenerování startovního simplexu podle zadaných parametrů nebo náhodně.
2. Opakování následujících kroků:
 - a. Vyhodnocení cílové funkce ve všech vrcholech simplexu.
 - b. Nalezení nejlepšího, nejhoršího a druhého nejhoršího vrcholu, které jsou označeny jako \vec{x}_l , \vec{x}_h resp. \vec{x}_s .
 - c. Nalezení centroidu (těžiště) na nejlepší straně simplexu podle rovnice

$$c = \frac{1}{n} \sum_{i \neq h} \vec{x}_i . \quad (5-12)$$

- d. Nalezení nového simplexu pomocí mechanismu zrcadlení, expanze nebo kontrakce. Pokud tyto mechanismy neuspějí ve vytvoření nového simplexu, je nový simplex nalezen zmenšením původního simplexu směrem k neoptimálnějšímu vrcholu \vec{x}_l .

i. Zrcadlení



Obrázek 5.1: Mechanismus zrcadlení Nelder-Meadovy metody [27]

Nový simplex je nalezen tak, že je vrchol \vec{x}_h nahrazen novým vrcholem \vec{x}_r' , který je dán rovnicí

$$\vec{x}_r' = c + \alpha(c - \vec{x}_h) . \quad (5-13)$$

Nový simplex je přijat, pokud je splněna rovnice

$$f(\vec{x}_l) \leq f(\vec{x}_r) < f(\vec{x}_s) . \quad (5-14)$$

Pokud je nově nalezený bod nejlepším stavem simplexu, tedy platí

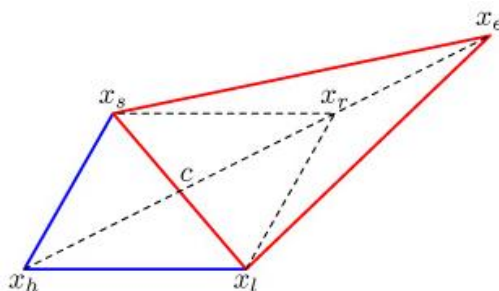
$$f(\vec{x}_r) < f(\vec{x}_l) , \quad (5-15)$$

pokusí se algoritmus najít nový simplex pomocí mechanismu expanze. Pokud naopak

$$f(\vec{x}_s) < f(\vec{x}_r) , \quad (5-16)$$

tedy pokud platí, že nově nalezený bod je druhým nejhorším bodem simplexu, je nový simplex definován mechanismem kontrakce.

ii. Expanze



Obrázek 5.2: Mechanismus expanze Nelder-Meadovy metody [27]

V případě expanze jsou souřadnice nového bodu, který nahradí vrchol \vec{x}_h , spočítány ze vztahu

$$\vec{x}_e = c + \alpha(\vec{x}_r - c) . \quad (5-17)$$

Zde se mohou jednotlivé verze Nelder-Meadovy metody lišit. V původní publikaci preferují autoři přístup „chamtivé expanze“. Bod \vec{x}_e je přijat jako nový vrchol simplexu, pokud platí

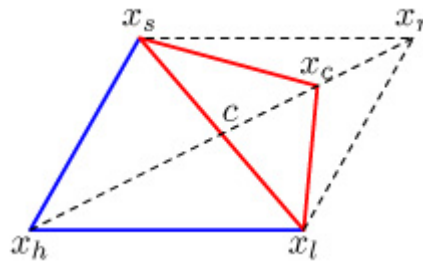
$$f(\vec{x}_e) < f(\vec{x}_l) . \quad (5-18)$$

Vztah mezi $f(\vec{x}_e)$ a $f(\vec{x}_r)$ tedy není důležitý. Modernější přístup praví, že je vhodnější přijmout lepší z obou nových stavů.

iii. Kontrakce

Mechanismus kontrakce se dále dělí na kontrakci vnitřní a vnější. Pokud je bod \vec{x}_r optimálnějším bodem než nejhorší \vec{x}_h , použije se kontrakce vnější. V opačném případě, je nový vrchol nalezen pomocí kontrakce vnitřní.

1. Vnější kontrakce



Obrázek 5.3: Mechanismus vnější kontrakce Nelder-Meadovy metody [27]

Vztah pro nový bod má tvar

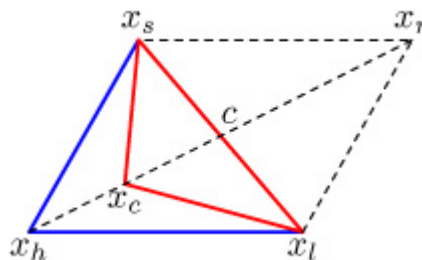
$$\vec{x}_c = c + \beta(\vec{x}_r - c). \quad (5-19)$$

Pokud platí

$$f(\vec{x}_c) < f(\vec{x}_r), \quad (5-20)$$

bod \vec{x}_c je přijat jako nový vrchol nahrazující \vec{x}_h , v opačném případě je původní simplex zmenšen

2. Vnitřní kontrakce



Obrázek 5.4: Mechanismus vnitřní kontrakce Nelder-Meadovy metody [27]

Vztah pro nový bod má tvar

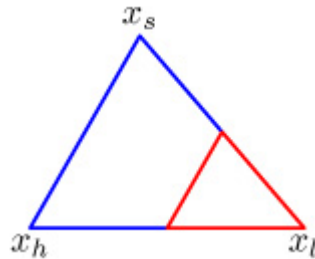
$$\vec{x}_c = c + \beta(\vec{x}_h - c). \quad (5-21)$$

Pokud platí

$$f(\vec{x}_c) < f(\vec{x}_h), \quad (5-22)$$

bod \vec{x}_c je přijat jako nový vrchol nahrazující \vec{x}_h , v opačném případě je původní simplex opět zmenšen.

iv. Zmenšení



Obrázek 5.5: Mechanismus zmenšení Nelder-Meadovy metody [27]

Zmenšení spočívá v nahrazení všech vrcholů kromě vrcholu \bar{x}_l , který zůstává do další iterace zachován. Zmenšení se řídí rovnicí

$$\bar{x}_j = \bar{x}_l + \delta(\bar{x}_j - \bar{x}_l). \quad (5-23)$$

e. Kontrola podmínek skončení optimalizace

Délka optimalizace může být definována různým způsobem. Nejčastější podmínkou je požadavek na velikost simplexu, pokud se simplex dostatečně zmenší, je možné prohlásit, že další optimalizace již nepřinese užitečnější výsledky. Dalšími méně běžnými podmínkami konce optimalizace jsou požadavek na hodnotu vyšetřované funkce nebo maximálně daný počet iterací algoritmu.

Výsledkem metody po jejím skončení je nejlepší vrchol posledního vyšetřovaného simplexu.

Nespornou výhodou Nelder-Meadovy metody je její jednoduchost a nenáročnost na potřebný výpočetní výkon oproti robustnějším metodám. Nelder-Meadova metoda obvykle potřebuje 1 nebo 2 vyhodnocení vyšetřované funkce pro jeden iterační cyklus. Spolu s faktem, že již po pár prvních iteracích konverguje k optimálnímu řešení velice rychle, ji činí vhodnou volbou pro úlohy s výpočetně náročnou cílovou funkcí a pro úlohy, kde je důležité najít velice rychle přijatelné suboptimální řešení.

Tato metoda je ovšem velice lehce ovlivnitelná šumem při výpočtu hodnot cílové funkce. Konvergence metody také není obecně dokázaná. I když metoda v praxi ukazuje velice dobré konvergenční chování, existují případy, kdy je možné algoritmus dostat do nekonečné smyčky a donutit ho ukončit optimalizaci. Při vyšetřování hladkých spojitých funkcí tento problém obvykle nenastává. Metoda nezohledňuje existenci mezních podmínek.

Hodnoty parametrů α , β , γ a δ je vhodné nastavit podle povahy vyšetřované funkce.

5.4.2.2 Rosenbrockova metoda [26] [28]

Rosenbrockova metoda hledání extrému funguje opakováním následujících bodů:

1. Vyhodnocení cílové funkce v aktuálním bodě.
2. Pro každý vektor $\vec{\xi}_l$ z ortogonální báze prostoru daného n proměnnými vstupního vektoru \vec{x} jsou provedeny kroky:
 - a. Vyhodnocení cílové funkce v novém bodě ve směru vektoru $\vec{\xi}_l$ vzdáleného o délku kroku s_1 od výchozího bodu

$$f(\vec{x}_k + s_{1,k} \cdot \vec{\xi}_l) \quad (5-24)$$

- b. Pokud je nalezený bod optimálnější stavem než bod výchozí, tedy pokud platí

$$f(\vec{x}_k + s_{1,k} \cdot \vec{\xi}_l) < f(\vec{x}_k), \quad (5-25)$$

je nový bod přijat do další iterace a délka kroku je upravena.

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + s_{1,k} \cdot \vec{\xi}_l \quad (5-26)$$

$$s_{1,k+1} = \alpha \cdot s_{1,k}$$

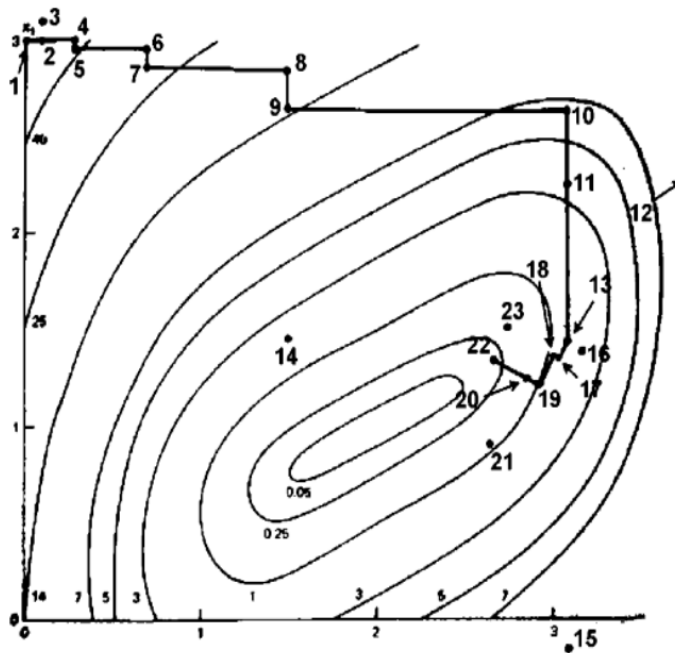
V opačném případě zůstává bod nezměněn, délku kroku je však také nutné upravit.

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k \quad (5-27)$$

$$s_{1,k+1} = -\beta \cdot s_{1,k}$$

3. Pokud pro každý směr $\vec{\xi}_l$ metoda alespoň jednou našla nové optimum a zároveň alespoň jednou zůstal vyšetřovaný bod nezměněn, vygeneruje metoda novou ortogonální bázi systému tak, že jeden z vektorů nového systému je rovnoběžný s odhadem gradientu, tedy se spojnicí prvního a posledního bodu, které byly vyšetřovány se systémem starým.
 4. Podmínky pro ukončení běhu algoritmu mohou spočívat ve stanovení minimální délky kroku, rozdílu hodnoty cílové funkce mezi iteracemi nebo může být maximální počet iterací pevně omezen.

Parametry α a β jsou pevně stanoveny před spuštěním optimalizace. Lepší pochopení principu fungování metody lze získat z následujícího obrázku.



Obrázek 5.6: Rosenbrockova metoda [29]

Iterace započne v bodě 1, vektory ortogonální báze systému jsou na začátku běhu programu vždy rovnoběžné s osami jednotlivých proměnných vstupního vektoru. Algoritmus střídá oba směry a posouvá aktuálně vyšetřovaný bod k optimu. Bod 12 je prvním nepřijatým bodem pro horizontální směr, proto zůstává bod 11 výchozím bodem pro posunutí ve vertikálním směru. Po přesunu do bodu 13 je vyšetřován opět horizontální směr a bod 14 je opět nepřijat. Teprve po nepřijetí bodu 15 algoritmus zaznamená alespoň jedno nepřijetí i přijetí bodů v obou směrech a je určena nová ortogonální báze, jejíž první vektor je rovnoběžný se spojnicí bodů 1 a 13.

Výhodou metody je její prokázaná konvergence. Metoda je i při své robustnosti stále rychlá. Nastavením počátečních kroků a parametrů α a β lze umožnit algoritmu prohledávat větší oblast. Díky tomu je možné často nalézt i optimum globální (nalezení globálního optima ovšem není zaručeno).

5.4.2.3 BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno algorithm) [22]

Tato metoda získává informaci o směru největšího spádu pomocí podmiňování gradientu (nebo odhadu gradientu) pomocí křivosti vyšetřované funkce. Toto zjednodušení je dosaženo postupným zpřesňováním odhadu Hessovy matice pomocí zatím známých gradientů funkce. Metoda nevyžaduje výpočet žádné inverzní matice, díky tomu je složitost každé iterace $\mathbf{O}(n^2)$ místo $\mathbf{O}(n^3)$, jak je tomu zvykem u podobných metod (například u Newtonovy metody).

Velkou nevýhodou algoritmu je jeho neschopnost pracovat s omezujícími podmínkami. Upravená verze metody s označením BFGS-B dokáže pracovat s jednoduchými omezeními tvaru n -dimenzionálního kvádru, tedy například

$$\vec{x} < \vec{b}, \quad (5-28)$$

kde \vec{b} je vektor konstant.

5.4.2.4 SLSQP (Sequential Least Square Programming) [22][30]

Metoda využívá Han-Powellův algoritmus spolu s prvky BFGS algoritmu. V každé iteraci je nalezeno nové řešení pomocí rovnice

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \alpha_k \cdot \vec{d}_k. \quad (5-29)$$

Směr dané iterace reprezentovaný jednotkovým vektorem \vec{d}_k lze určit řešením rovnice

$$\min_{\vec{d} \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} \cdot \vec{d}^T B_k \vec{d} + \nabla f(\vec{x}_k) \vec{d}. \quad (5-30)$$

Parametr B_k je nejčastěji dán vztahem

$$B_k = \nabla^2 L(\vec{x}, \vec{\lambda}). \quad (5-31)$$

Lagrangian je v tomto případě aproximován pomocí linearizovaných mezních podmínek $g_j(\vec{x})$ kolem vyšetřovaného bodu.

$$L(x, \lambda) = f(\vec{x}_k) - \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j(\vec{x}). \quad (5-32)$$

Pro výpočet optimální délky kroku je provedena jednorozměrná optimalizační úloha ve tvaru

$$\min_{\alpha} (\vec{x}_k + \alpha_k \cdot \vec{d}_k). \quad (5-33)$$

Algoritmus dále využívá dalších numerických metod na řešení dílčích rovnic a linearizaci mezních podmínek. Algoritmus taktéž pro každou iteraci vybírá jen potenciálně překročitelné mezní podmínky, díky tomu je schopen ušetřit výpočetní výkon. Po každé iteraci je platnost mezních podmínek ověřena.

Algoritmus SLSQP je jednou z nejlepších numerických metod pro lokální optimalizaci. Metoda nevyžaduje nastavování žádných parametrů optimalizace a je proto uživatelsky velice přívětivá. Metoda je podrobně popsána v [30].

6 Výběr koncepce řešení

Pro úspěšné zhotovení nástroje pro optimalizaci nákladů obráběcích procesů, který získal označení AMCO (Advanced Machining Cost Optimizer) je nejprve nutné rozhodnout o koncepci celého programu. Nezbytné je zvolit prostředí, ve kterém bude nástroj vyvíjen. Je nutné definovat rozsah a způsob určování nákladů pro stanovení cílové funkce optimalizace. V neposlední řadě je nutné zvolit vhodnou optimalizační metodu.

6.1 Vývojové prostředí

Podle ambicióznosti práce lze pro vývoj kalkulačky nákladů zvolit z celé škály známých a používaných platforem pro vývoj aplikací. Zvažovaná prostředí byla sepsána do tabulky včetně jejich hlavních výhod a nevýhod.

<i>PROSTŘEDÍ</i>	<i>VÝHODY</i>	<i>NEVÝHODY</i>
MS EXCEL	<ul style="list-style-type: none"> - Jednoduché a rychlé řešení - Jednoduchá přenositelnost na různá zařízení díky rozšířenosti MS Excel - Jednoduchá tvorba tabulkového vstupního i výstupního rozhraní 	<ul style="list-style-type: none"> - Omezené možnosti oproti ostatním prostředím - Nevhodné pro výpočetně náročné aplikace - Menší přehlednost při matematicky složitých a rozsáhlých projektech
MATLAB	<ul style="list-style-type: none"> - Zabudovaná podpora celé řady optimalizačních nástrojů - Možnost tvorby programové logiky a komplexních algoritmů - Snadná tvorba výstupních grafů 	<ul style="list-style-type: none"> - Nutnost mít nainstalovaný Matlab pro spuštění programu - Složitější tvorba přehledného grafického rozhraní - Časová náročnost tvorby nástroje
PYTHON	<ul style="list-style-type: none"> - Možnost tvorby programové logiky a komplexních algoritmů - Rozsáhlé možnosti tvorby grafického rozhraní díky existujícím knihovnám - Možnost zkompileovat program do spustitelného formátu .exe 	<ul style="list-style-type: none"> - Časová náročnost tvorby nástroje - Méně optimalizováno pro náročné výpočty než Matlab
C++	<ul style="list-style-type: none"> - Plná kontrola nad výpočetními procesy a možnost optimalizace programu 	<ul style="list-style-type: none"> - Velká časová náročnost tvorby nástroje

Pro kvalifikovaný výběr vhodného prostředí je nutné vymezit účel vytvořeného nástroje. Pokud by cílovou skupinou programu byla výhradně akademická sféra, byl by Matlab pravděpodobně nejvhodnějším prostředím pro vývoj daného nástroje. Program byl ovšem navrhován s ohledem na jeho uživatelskou přívětivost, aby mohl být v budoucnu využitelný i pro soukromé nebo komerční účely.

I když MS Excel představuje uživatelsky velice přívětivou a známou platformu, z důvodu komplexnosti navrhovaného nákladového modelu popsaného v kapitole 7 je pro vývoj tohoto nástroje nedostatečný. Jistým kompromisem mohla být implementace VBA maker (Visual Basic), dle zkušeností by ovšem responzivnost takového programu mohla hraničit s nepoužitelností.

Pro vývoj optimalizačního nástroje byl vybrán vyšší programovací jazyk python jako kompromis mezi ryze profesionálním postupem v podobě pracného programování v C++ a udržitelností rozsahu programu jako celku v mezích diplomové práce.

6.2 Způsob stanovení nákladů

Z kapitoly 3 je patrné, jak velký vliv může mít použitá kalkulační metoda na výslednou výši nákladů. Snaha o určení všech nákladů na danou kalkulační jednici s sebou nese zjednodušení, která mohou výsledek značně zkreslit, v modelu proto nebude uvažována většina režijních nákladů. Tyto náklady může uživatel do modelu promítnout pomocí veličiny *hodinová režijní sazba podniku*, které bude věnována kapitola 7.7. Pro určení nákladů obráběcí operace bude využit převážně přístup ABC. Pro větší přehlednost započítaných nákladů budou ovšem zvlášť uvažovány náklady na operaci spojené s lidskou obsluhou, strojním zařízením a nástrojem.

Pokud nebude hodinová režijní sazba podniku specifikována, je nutné postulovat, že skutečné optimum rezných podmínek bude oproti zjištěným hodnotám posunuté a bude ležet v oblasti kratších strojních časů. Čím bude vliv režijních nákladů větší, tím více bude reálné optimum favorizovat případy, kdy se režijní náklady rozdělí mezi větší počet výrobků.

6.3 Optimalizační metoda

Z kapitoly 2.5 vyplývá, že pro standardně se chovající nástroje má nákladová křivka právě jedno minimum. Pro případ nákladové optimalizace lze použít některou z metod hledání lokálního extrému. Pokud by byl v budoucnu program rozšířen i o další druhy optimalizačních kritérií, jako například zisk za jednotku času, nebo pokud by do programu byla implementována možnost definování měkké omezující podmínky, jako může být například žádaný takt výroby,

nebyla by zaručena konvexnost nákladové funkce. V takovém případě by bylo vhodnější použít globální optimalizační metodu.

Jelikož je implementace globálních optimalizačních metod pracnější a samotný výpočet je několikanásobně pomalejší, než je tomu u lokálních metod, budou do programu zatím implementovány jen metody lokální. Způsob implementace metody ovšem umožní jednoduchou výměnu metody v případě potřeby.

Lokálních optimalizačních metod je celá řada. Jelikož je tvar nákladové funkce relativně prostý, mohlo by se zdát, že na výběru konkrétní metody nezáleží. V průběhu kapitoly 7 bude ovšem odvozen složitější nákladový model, který zohledňuje maximální možné otáčky vřetene v případě soustružení. Nákladová funkce z tohoto důvodu nemusí být hladká.

Do programu bude proto implementováno několik optimalizačních metod, mezi kterými lze volně přepínat a jejich výsledky porovnávat pro další analýzu.

7 Model obráběcího procesu

Při obrábění i poměrně jednoduchých tvarů existuje celá řada strategií pro volbu trajektorie řezného nástroje, jak již ukázal kalkulátor MC² popsany v kapitole 4.3. Možnost nastavení a vyhodnocování všech těchto trajektorií by vedla nejen k velice komplikovanému modelu [15], ale také k nepřehlednosti zadávaných dat a jejich zobrazení bez rozsáhlé investice do grafických možností programu.

Z těchto důvodů byl zvolen přístup k určení řezných časů pomocí výpočtu a analýzy obráběného objemu. Předpokladem je, že pro zkoumanou technologii obrábění lze nalézt vztah

$$t_{AS} = f(V_{ob}, v_c, A_d) \quad , \quad (7-1)$$

kde t_{AS} značí strojní čas potřebný k obrobení objemu V_{ob} při řezných podmínkách daných řeznou rychlostí v_c a průřezem třísky A_d . Rozdíl mezi jednotlivými technologiemi se promítne do změny tohoto vztahu.

Program AMCO je od počátku navrhován tak, aby dokázal obsáhnout celou řadu obráběcích procesů a byl na charakteru procesu závislý pouze programovou třídou *Proces*. Nastavení procesu slouží k přenesení výpočtů některých veličin od uživatele do programu. Hlavním účelem programové třídy *Proces* je zjištění vztahu mezi řeznou rychlostí, průřezem třísky a strojním časem t_{AS} . Z důvodu přiměřenosti rozsahu práce rozlišuje program v této verzi pouze proces *obecné obrábění* (bez bližšího nastavení) a *soustružení*.

Díky přehledné dokumentaci a zásadám objektivě orientovaného programování je možné program rozšířit o podporu dalších obráběcích procesů jako je frézování nebo hoblování.

7.1 Skladba časů

Nejprve je potřeba definovat některé časové veličiny, které model obráběcího procesu používá.

7.1.1 Čas řezu t_{AScut}

Význam tohoto času a postup jeho výpočtu bude podrobně popsán v kapitole 7.2. Jedná se o dobu, po kterou je obráběcí nástroj v kontaktu s obrobkem. Po tuto dobu je spotřebovávána trvanlivost nástroje a obráběcí stroj odebírá obvykle větší množství elektrické energie.

7.1.2 Strojní čas t_{AS}

Je doba, po kterou je daný stroj využíván obrobkem. Lze jej definovat vztahem

$$t_{AS} = C_V \cdot t_{AS_{cut}} + t_{ASN} + t_{ASP} \quad (7-2)$$

kde C_V je konstanta udávající poměr doby obrábění ku času řezu a charakterizuje tedy obráběcí proces. V případě soustružení je nástroj v kontaktu s obrobkem téměř po celou dobu samotného obrábění. Například v případě hoblování stráví nástroj nezanedbatelný podíl strojního času v nepracovním zdvihu. Jelikož je tato část neproduktivního času úměrná obráběnému objemu, je ve výpočtu zohledněna právě přes konstantu C_V .

Tento způsob určení strojního času byl zvolen s ohledem na univerzálnost programu, který díky této koncepci charakterizuje modely mnoha obráběcích technologií stejnými vztahy. Čas řezu $t_{AS_{cut}}$ všech obráběcích procesů je popsán závislostí na obráběném objemu. Program uvažuje vliv trajektorie nástroje a vliv použité technologie na strojní čas pouze pomocí konstanty C_V .

Příklad:

Při hoblování podle obrázku 7.1 je zřejmé, že během jednoho dvojzdvihu je nástroj v kontaktu s obrobkem po dobu

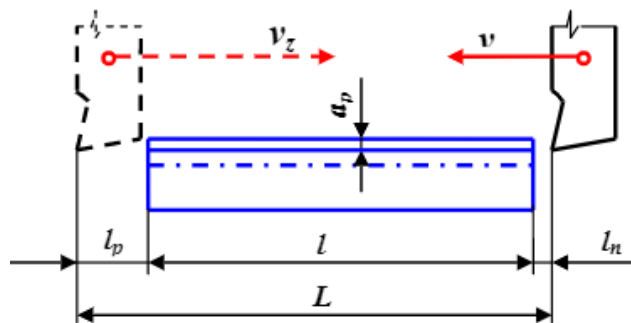
$$t_{dz_{cut}} = \frac{l}{v} \quad (7-3)$$

Čas celého dvojzdvihu lze změřit například pomocí stopek nebo přibližně určit podle vztahu

$$t_{dz} = \frac{L}{v} + \frac{L}{v_z} \quad (7-4)$$

Parametr C_V je dán podílem těchto dvou veličin

$$C_V = \frac{t_{dz}}{t_{dz_{cut}}} \quad (7-5)$$



Obrázek 7.1: Schéma hoblování [31]

Další možností, jak hodnotu parametru C_V zjistit, je odhad pomocí výsledků z programu AMCO. Pokud budou vstupy programu nastaveny tak, aby odpovídaly reálnému procesu, lze hodnotu C_V měnit ručně, dokud není nalezena shoda mezi reálným a spočítaným strojním časem.

Časy t_{ASN} a t_{ASP} odpovídají nájezdu nástroje do místa řezu, respektive jeho výjezdu z řezu do výchozí polohy. Tyto časy uživatel zadává nepřímo pomocí rychlosti přejezdu nástroje v_T [m/s] a délky trajektorií l_{in} [mm] a l_{out} [mm], které nástroj při příjezdu, resp. výjezdu urazí. Výpočet časů se řídí rovnicemi

$$t_{ASN} = \frac{l_{in}}{60000 \cdot v_T} ,$$

$$t_{ASP} = \frac{l_{out}}{60000 \cdot v_T} .$$
(7-6)

7.1.3 Čas přejezdů $t_{transfer}$

Část strojního času, kdy nástroj není v řezu, ale stroj koná práci posuvem nástroje nebo obrobku, je označena jako $t_{transfer}$. Čas přejezdů lze získat pouhým odečtením strojního času a času řezu.

$$t_{transfer} = t_{AS} - t_{AScut} = (C_V - 1) \cdot t_{AScut} + t_{ASN} + t_{ASP},$$
(7-7)

7.1.4 Neproduktivní čas t_i

Neproduktivní čas t_i v sobě zahrnuje čas na výměnu nástroje na operaci t_{ct} , dávkový čas na operaci t_{Bn} a další časy neproduktivních činností, jako je vyjmutí a upnutí obrobku, spuštění programu, umístění obrobku na paletu atd., které jsou souhrnně označeny jako t_{An} .

$$t_i = t_{ct} + t_{Bn} + t_{An}$$
(7-8)

Všechny tyto časy jsou již přepočteny na danou operaci pomocí vztahů

$$t_{Bn} = \frac{t_B}{d_v} ,$$
(7-9)

$$t_{AVn} = t_{Vn} \cdot T_p ,$$

kde t_B značí dávkový čas a d_v udává velikost dávky. Čas t_{Vn} udává doby výměny nástroje. Poměrná spotřeba trvanlivost T_p bude definována v kapitole 7.4.1.

7.1.5 Čas operace t_o

Celkový čas operace lze na základě výše definovaných časů spočítat jako

$$t_o = t_{AS} + t_i = t_{AS} + t_{AVn} + t_{Bn} + t_{An} \quad (7-10)$$

7.2 Obecný proces

Proces s označením *obecný proces* nepřináší uživateli programu žádnou pomoc při výpočtech parametrů procesu. Uživatel zadává do systému přímo závislost strojního času na řezných podmínkách ve formě vztahu

$$t_{AScut} = C_t \cdot \frac{V_{ob}}{a_p \cdot f_n \cdot 1000 \cdot v_c} = C_t \cdot \frac{V_{ob}}{a_p \cdot f_z \cdot 1000 \cdot v_c \cdot z} \quad (7-11)$$

Uživatel specifikuje celkový obráběný objem v mm^2 , který je nutné ručně spočítat podle zvolené metody. Parametr C_t udává využití nástroje, a je využitelný především u frézování; pro soustružení nebo hoblování má parametr hodnotu 1. Při frézování závisí obráběný objem i na dalších parametrech, jako je šířka řezu, nebo na rozměrech frézy. Parametr C_t je nutné opět dopočítat podle daných podmínek.

Příklad 1:

Při válcovém frézování popsaném na obrázku *Obrázek 2.2: Válcové a čelní frézování* [8] odebere každý zub objem materiálu o velikosti

$$V_{obz} = H \cdot B \cdot f_z = H \cdot B \cdot \frac{f_n}{z} \quad (7-12)$$

Za čas t je odebrán materiál o objemu

$$V_{ob} = H \cdot B \cdot \frac{f_n}{z} \cdot z \cdot n \cdot t \quad (7-13)$$

Vyjádřením času t a porovnáním s rovnicí 7-11 lze dospět ke vztahu

$$\frac{V_{ob}}{H \cdot B \cdot f_n \cdot n} = C_t \cdot \frac{V_{ob}}{a_p \cdot f_n \cdot 1000 \cdot v_c} \quad (7-14)$$

Za v_c lze dosadit z rovnice 7-19. Podle obrázku odpovídá rozměr B hloubce řezu a_p . Parametr C_t lze poté odvodit jako

$$\frac{V_{ob}}{H \cdot a_p \cdot f_n \cdot n} = C_t \cdot \frac{V_{ob}}{a_p \cdot f_n \cdot n \cdot \pi \cdot d} , \quad (7-15)$$

$$C_t = \frac{\pi \cdot d}{H} ,$$

kde d značí průměr frézy.

Příklad 2:

Při čelním frézování taktěž z obrázku *Obrázek 2.2: Válcové a čelní frézování [8]* lze pro závislost odebíraného objemu na čase odvodit závislost

$$V_{ob} = a_p \cdot B \cdot \frac{f_n}{z} \cdot z \cdot n \cdot t . \quad (7-16)$$

Porovnáním s rovnicí 7-11 lze analogicky dospět ke vztahu

$$\frac{V_{ob}}{B \cdot a_p \cdot f_n \cdot n} = C_t \cdot \frac{V_{ob}}{a_p \cdot f_n \cdot n \cdot \pi \cdot d} , \quad (7-17)$$

$$C_t = \frac{\pi \cdot d}{B} .$$

Model *obecný proces* pracuje jen s konstantní hodnotou řezné rychlosti. Model rovněž umožňuje uživateli definovat hodnotu parametru C_v , jehož význam byl popsán výše.

Tento typ procesu tedy lze využít pro simulaci jiných obráběcích procesů, které zatím program AMCO nepodporuje přímo.

7.3 Soustružení

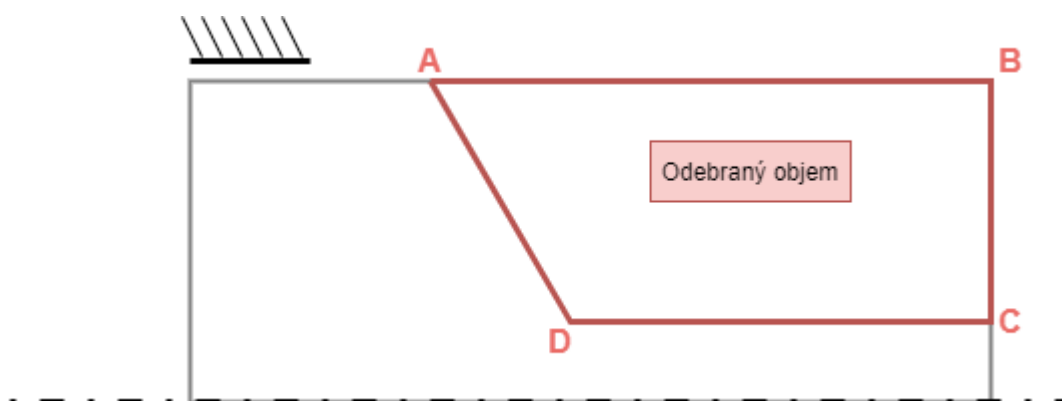
Závislost času řezu na objemu je u procesu typu soustružení opět dána stejným vztahem jako u obecného procesu, proces soustružení ovšem uživateli pomůže s výpočtem obráběného objemu.

$$t_{ascut} = C_t \cdot \frac{V_{ob}}{a_p \cdot f_n \cdot 1000 \cdot v_c} \quad (7-18)$$

Proces typu soustružení je popsán obrazcem znázorňujícím průřez odebraného materiálu danou operací. Tvar obrazce uživatel specifikuje pomocí čtveřice bodů definovaných v rovině, v níž leží osa součásti. Úsečky AB a BC na obrázku 7.2 značí povrch obrobku před danou operací, úsečky AD a DC potom označují konečný povrch obráběné součásti.

Program podporuje i mód pro jednoduché válcové soustružení, které lze definovat počátečním a konečným průměrem a soustruženou délkou. Mezi oběma režimy zadávání dat lze volně

přepínat. Při zadání dat v módu jednoduchého válcového soustružení jsou zadané rozměry interně přepočítány na souřadnice bodů A, B, C, D.



Obrázek 7.2: Definování operace soustružení

Během obráběcího procesu se může stát, že vstupní veličiny nebudou konstantní. Typickým příkladem může být soustruh pracující s konstantními otáčkami místo konstantní řezné rychlosti. Řezná rychlost je poté dána vztahem

$$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot d}{1000}, \quad (7-19)$$

kde n je konstanta udávající počet otáček vřetene za minutu. Obráběný průměr se však v čase může měnit. I v případě, že budou brány v potaz jen moderní stroje pracující přímo s řeznou rychlostí, narazí proces v mnoha případech na fyzické limity stroje, a to zejména při upichovacích operacích, při nichž by se otáčky stroje musely limitně blížit k nekonečnu, aby se řezná rychlost udržela na konstantní nenulové hodnotě, jak dokazuje upravený vztah

$$n = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d}. \quad (7-20)$$

Proto program nejprve určí minimální soustružený průměr jako minimum z y souřadnic jednotlivých bodů A, B, C, D.

$$d_{min} = \min(y_A, y_B, y_C, y_D) \quad (7-21)$$

Mezní průměr, který ještě lze soustružit při zvolené rychlosti, aniž by došlo k teoretickému překročení maximálních otáček vřetene, lze určit ze vztahu

$$d_{mez} = \frac{1000 \cdot v_c}{n_{max} \cdot \pi}. \quad (7-22)$$

Na základě rozdílu mezi výše zmíněnými průměry lze rozlišit 3 situace:

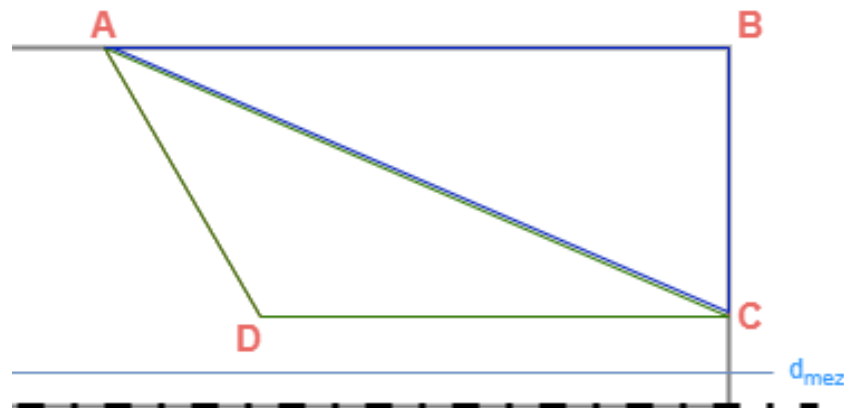
- soustružení za stálé řezné rychlosti,
- soustružení přechodné, jehož část probíhá za stálé rychlosti a druhá část za stálých otáček,
- soustružení za stálých otáček.

7.3.1 Soustružení za stálé řezné rychlosti

Pokud platí, že mezní průměr je menší nebo roven průměru d_{min} , lze použít pro soustružení model s konstantní rychlostí. Objem soustruženého objemu se poté spočítá jako

$$V_{ob} = S_{ob} \cdot y_T \cdot 2 \cdot \pi \quad . \quad (7-23)$$

S_{ob} označuje obsah obrazce, který vznikne řezem soustruženého objemu rovinou procházející osou vřetene. Tento obsah je vynásoben délkou trajektorie, kterou opíše těžiště tohoto obrazce. Trajektorií je v tomto případě kružnice, jejíž průměr je určen y souřadnicí těžiště obrazce y_T . Výpočet souřadnic těžiště n -úhelníku a jeho obsahu je sice analyticky zvládnutelný, pro výpočet V_{ob} bude ovšem použit rozklad na trojúhelníky, který výrazně zjednoduší následnou algoritmizaci.



Obrázek 7.3: Rozdělení obráběného obrazce na trojúhelníky

$$V_{ob} = \left(\sum_{i=1}^n S_i \right) \cdot y_T \cdot 2 \cdot \pi \quad (7-24)$$

Úpravami lze ze vztahu eliminovat souřadnici těžiště celého obrazce y_T .

$$\begin{aligned}
V_{ob} &= \left(\sum_{i=1}^n S_i \right) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \cdot y_{T_i})}{S_{ob}} \cdot 2 \cdot \pi \\
&= \frac{(\sum_{i=1}^n S_i)}{S_{ob}} \cdot \sum_{i=1}^n (S_i \cdot y_{T_i}) \cdot 2 \cdot \pi \\
&= \sum_{i=1}^n (S_i \cdot y_{T_i}) \cdot 2 \cdot \pi \quad .
\end{aligned} \tag{7-25}$$

Obsahy jednotlivých trojúhelníků jsou označeny proměnnou S_i , jejich těžiště jako y_{T_i} . Parametr n nabývá pro tento případ hodnotu 2 (obecně potom $m-2$, kde m je počet vrcholů m -úhelníku děleného na trojúhelníky). Souřadnice těžiště trojúhelníku lze určit jako průměr souřadnic vrcholů. V případě n -úhelníku na obrázku 7.3 jako

$$\begin{aligned}
y_{T_1} &= \frac{y_A + y_B + y_C}{3} \quad , \\
y_{T_2} &= \frac{y_A + y_D + y_C}{3} \quad .
\end{aligned} \tag{7-26}$$

Obsah trojúhelníku lze spočítat například pomocí Heronova vzorce, který pracuje s délkami stran, jež lze určit použitím Pythagorovy věty. Přímočarejší a efektivnější je výpočet pomocí determinantu, který udává n -rozměrný objem n -rozměrného rovnoběžnostěnu určeného vektory ve sloupcích nebo řádcích matice. V tomto případě se jedná o obsah rovnoběžníku definovaného úsečkami AB a AC, respektive AC a AD.

Vektor reprezentující úsečku AB lze získat užitím vzorce

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \end{bmatrix} \quad . \tag{7-27}$$

Vektory pro úsečky AC a CD jsou určeny analogicky

$$\begin{aligned}
\vec{v} &= \begin{bmatrix} x_C - x_A \\ y_C - y_A \end{bmatrix} \quad , \\
\vec{w} &= \begin{bmatrix} x_D - x_A \\ y_D - y_A \end{bmatrix} \quad .
\end{aligned} \tag{7-28}$$

Obsahy trojúhelníků jsou dány vztahy

$$\begin{aligned}
S_1 &= \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{vmatrix} \quad , \\
S_2 &= \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{vmatrix} \quad .
\end{aligned} \tag{7-29}$$

Pomocí hodnot těchto obsahů a souřadnic těžišť již není problém spočítat čas řezu pro tento případ soustružení.

7.3.2 Soustružení za stálých otáček

Vzorec 7-18 definuje čas obrábění jako funkci konstantních vstupů. Při soustružení při stálých otáčkách ovšem řezná rychlost roste se soustružením větších průměrů. Parametr C_t nabývá pro soustružení hodnotu 1. Vztah je proto nutné upravit na

$$t_{ascut} = \iiint_{V_{ob}} \frac{dV}{a_p \cdot f_n \cdot 1000 \cdot v_c(r)} \quad . \quad (7-30)$$

Závislost řezné rychlosti na radiální souřadnici lze popsat vztahem

$$v_c(r) = \frac{n \cdot 2\pi r}{1000} \quad . \quad (7-31)$$

Po dosazení do rovnice 7-30 a rozepsání soustruženého objemu v cylindrických souřadnicích získá integrál tvar

$$t_{ascut} = \frac{1}{2 \cdot a_p \cdot f_n \cdot n \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} \iint_{S_{ob}} \frac{1}{r} \cdot r \, dS \, d\varphi \quad . \quad (7-32)$$

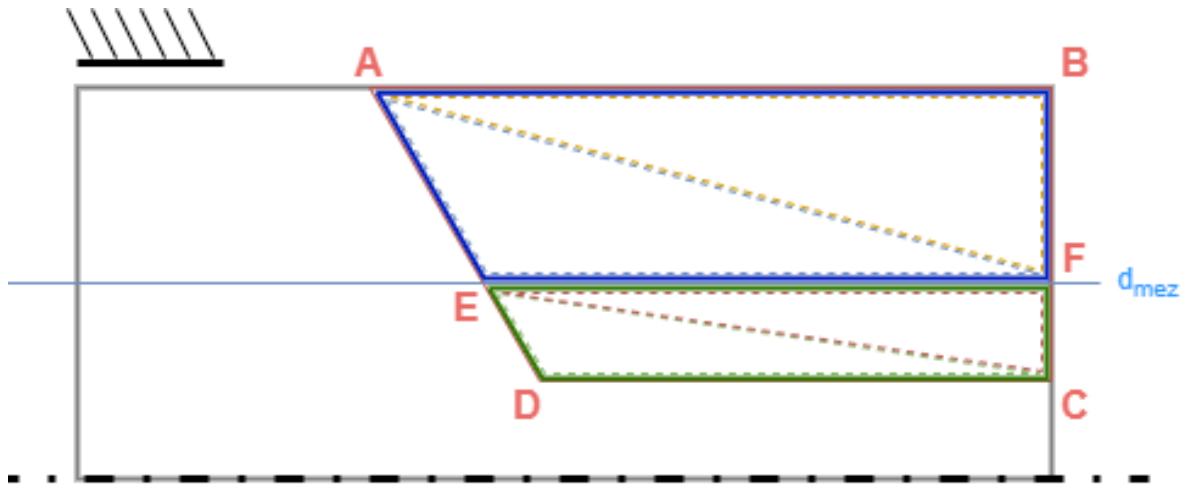
Díky Jakobiánu cylindrických souřadnic $|J| = r$ lze integrál vyřešit velice jednoduše:

$$t_{ascut} = \frac{S_{ob}}{n \cdot a_p \cdot f_n} \quad . \quad (7-33)$$

Obsah S_{ob} je určen jako součet obsahů trojúhelníků tvořících zkoumaný n -úhelník. Obsahy trojúhelníků jsou určeny obdobně jako v případě rovnic 7-29.

7.3.3 Soustružení přechodné

V případě, že se průměr d_{mez} nachází uvnitř obráběného obrazce, je nutné model rozdělit na 2 části, právě podle přímky, která je od osy vzdálená $r_{mez} = d_{mez}/2$.



Obrázek 7.4: Rozdělení obráběného obrazce na 2 části

Obrazce pod a nad přímkou d_{mez} jsou n -úhelníky, kde $n \in \{3, 4, 5\}$. Z toho vyplývá, že dané obrazce lze rozložit na 1,2 nebo 3 trojúhelníky. Pro určení těchto trojúhelníků je nejprve potřeba určit souřadnice bodů E a F.

Každý bod bude popsán jeho souřadnicemi a pořadovým číslem tak, aby body seřazené podle pořadových čísel opisovaly hranici n -úhelníku po směru hodinových ručiček.

$$\begin{aligned} A &= [x_A, y_A, P_A]^T; P_A = 1 \\ B &= [x_B, y_B, P_B]^T; P_B = 2 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (7-34)$$

Body A, B, C, D jsou roztrženy podle své polohy do množin

$$\begin{aligned} \mathbf{B}'_v &= \{b \in \{A, B, C, D\} | y_b \geq r_{mez}\} \quad , \\ \mathbf{B}'_n &= \{b \in \{A, B, C, D\} | y_b < r_{mez}\} \quad . \end{aligned} \quad (7-35)$$

Dále jsou určeny úsečky, na kterých body E, F leží:

$$\mathbf{U}_F = \{b_v b_n; b_v \in \mathbf{B}'_v; b_n \in \mathbf{B}'_n\} \cap \{AB, BC, CD, DA\} = \{u_1, u_2\} \quad , \quad (7-36)$$

Množina \mathbf{U}_F obsahuje právě 2 prvky: u_1 a u_2 , které označují úsečky protínající přímkou d_{mez} . Pro příklad z obrázku 7.4 vypadá množina \mathbf{U}_F následovně: $\mathbf{U}_F = \{BC, DA\}$.

Krajní body úsečky u_1 a u_2 jsou označeny obecně E1 a E2, resp. F1 a F2. Pro příklad z obrázku tedy platí: E1 = B, E2 = C, F1 = D, F2 = A. Souřadnice bodů E, F lze získat z podobností trojúhelníků pomocí vztahů

$$\frac{y_{E1} - r_{mez}}{y_{E1} - y_{E2}} = \frac{x_{E1} - x_E}{x_{E1} - x_{E2}}, \text{ resp.} \quad (7-37)$$

$$\frac{y_{F1} - r_{mez}}{y_{F1} - y_{F2}} = \frac{x_{F1} - x_F}{x_{F1} - x_{F2}} .$$

Úpravou vztahu lze získat rovnice

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ P_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{E1} - r_{mez}}{y_{E1} - y_{E2}} \cdot (x_{E2} - x_{E1}) + x_{E1} \\ r_{mez} \\ P_{E2} - 0,5 \end{bmatrix}, \quad (7-38)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{F1} - r_{mez}}{y_{F1} - y_{F2}} \cdot (x_{F2} - x_{F1}) + x_{F1} \\ r_{mez} \\ P_{F2} - 0,5 \end{bmatrix} .$$

Třetí položka vektorů bodů E a F značí opět pořadové číslo, které je určeno právě tak, aby seřazením bodů podle pořadových čísel vznikl smysluplný popis n -úhelníku.

Body E a F jsou součástí obou útvarů z obrázku 7.4, proto lze definovat množiny obsahující všechny krajní body těchto n -úhelníků jako

$$\mathbf{B}_v = \mathbf{B}'_v \cup \{E, F\} , \quad (7-39)$$

$$\mathbf{B}_n = \mathbf{B}'_n \cup \{E, F\} .$$

Prvky množin \mathbf{B}_v a \mathbf{B}_n jsou seřazeny tak, že pořadí bodů opisuje oba n -úhelníky po směru hodinových ručiček.

$$\mathbf{B}_{vs} = (B_{v1}, B_{v2}, \dots, B_{vn}); B_{vi} \in \mathbf{B}_v; P_{B_{vi}} < P_{B_{vj}}$$

$$\text{pro } \forall(i, j): i < j; i, j \in \mathbb{N} \cap \langle 1, n \rangle \quad (7-40)$$

$$\mathbf{B}_{ns} = (B_{n1}, B_{n2}, \dots, B_{nm}); B_{ui} \in \mathbf{B}_n; P_{B_{ni}} < P_{B_{nj}}$$

$$\text{pro } \forall(i, j): i < j; i, j \in \mathbb{N} \cap \langle 1, m \rangle$$

Pro případ z obrázku 7.4 lze dospět k

$$\mathbf{B}_{vs} = (E, A, B, F) , \quad (7-41)$$

$$\mathbf{B}_{ns} = (E, F, C, D) .$$

Následuje rozdělení n -úhelníku (B_{v1}, B_{v2}, \dots) a m -úhelníku (B_{n1}, B_{n2}, \dots) na trojúhelníky pro výpočet objemu, popřípadě obsahu obráběné části, respektive jejího průřezu.

$$\begin{aligned}
\Delta_{v1} &= \Delta B_{v1} B_{v2} B_{v3} \\
\Delta_{v2} &= \Delta B_{v1} B_{v3} B_{v4} \\
&\vdots \\
\Delta_{v(n-2)} &= \Delta B_{v1} B_{v(n-1)} B_{vn} \\
\Delta_{n1} &= \Delta B_{n1} B_{n2} B_{n3} \\
\Delta_{n2} &= \Delta B_{n1} B_{n3} B_{n4} \\
&\vdots \\
\Delta_{n(m-2)} &= \Delta B_{n1} B_{n(m-1)} B_{nm}
\end{aligned} \tag{7-42}$$

Dále je algoritmus rozdělen na dvě paralelní části. Trojúhelníky s indexem v jsou použity pro výpočet času řezu $t_{AScut,v}$ v podmínkách s konstantní řeznou rychlostí. Výpočet objemu V_{ob} ze získaných trojúhelníků je analogický s postupem uvedeným v kapitole 7.3.1. Tedy platí, že

$$V_{ob} = \sum_{i=1}^n (S_{\Delta_{vi}} \cdot y_{T\Delta_{vi}}) \cdot 2 \cdot \pi \quad . \tag{7-43}$$

Vztah 7-33 lze využít pro výpočet času řezu v podmínkách s konstantními otáčkami $t_{AScut,n}$. Obsah S_{ob} lze získat jako součet obsahů trojúhelníků s indexem n .

$$S_{ob} = \sum_{i=1}^m S_{\Delta_{ni}} \tag{7-44}$$

Výsledný čas řezu se poté přibližně rovná

$$t_{ascut} = t_{ascut,v} + t_{ascut,n} \quad . \tag{7-45}$$

7.4 Náklady na nástroj

7.4.1 Trvanlivost nástroje

Náklady na obráběcí nástroj jsou vyhodnoceny pomocí přístupu Activity based costing. Jelikož je při obráběcím procesu řezný nástroj opotřebováván, je životnost nástroje proměnlivá a závisí na parametrech obráběcího procesu, a to především na řezné rychlosti v_c , posuvu na otáčku f_n (nebo posuvu na zub f_z) a hloubce řezu a_p , ale také na dalších vlivech jako na chlazení nástroje nebo na materiálových vlastnostech obrobku. Výpočet trvanlivosti je tudíž možný jen na základě empirického vztahu, který je vždy pevně spjat s danou aplikací. Optimalizační program pracuje s trvanlivostí T danou Taylorovým vztahem v komplexním tvaru:

$$T = \left(\frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot v_c} \right)^m \quad , \tag{7-46}$$

kde vektor $[C_v, x_v, y_v, m]$ obsahuje empirické konstanty, které je nutno pro daný stroj a nástroj zjistit experimentálně.

Vstupem do vybraného empirického modelu jsou veličiny a_p, f, v_c . Pro soustružení by veličina f , která charakterizuje tloušťku třísky, odpovídala posuvu na otáčku f_n . Pro jiné procesy jako je například frézování, bude tloušťka třísky záviset na posuvu na zub f_z . Hodnotu f je tedy nutné určit podle povahy obráběcího procesu a počtu břitů na nástroji.

Z hlediska vyčíslení nákladů je nutné pro každou operaci určit její procentuální příspěvek k opotřebení nástroje. Pro tyto účely je zbytečné kalkulovat s rozdílnou rychlostí opotřebením v různých fázích životnosti nástroje [12]. Pokud by výpočtový vzorec zahrnoval fakt, že se nový nástroj opotřebovává rychleji než nástroj v polovině své životnosti, byly by získány různé výše nákladů pro 2 naprosto totožné výrobky, jen na základě jejich pořadí ve výrobě. Pro účely nákladového modelu je uvažován lineární průběh opotřebením v čase při stejných řezných podmínkách. Model tedy nejlépe funguje při hromadné výrobě, kde je během existence dané operace spotřebováno mnoho nástrojů. Poté je pro nákladový model relevantní pouze celková doba trvanlivosti, a ne samotný průběh opotřebením.

Taylorův vztah lze na základě výše uvedeného předpokladu přepsat na:

$$T_p = \left(\frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot v_c} \right)^{-m} \cdot \tau \quad (7-47)$$

Nová veličina T_p [-] (poměrná spotřeba trvanlivosti) udává podíl životnosti nástroje spotřebovaný za čas τ . Podmínkou je, že během doby τ jsou vstupní veličiny a_p, f_n a v_c konstantní. Tento vzorec je tedy vhodný pro určení trvanlivosti nástroje při soustružení s konstantními řeznými podmínkami.

Čas, který nástroj stráví za danou operaci v řezu, lze odhadnout pomocí vztahu

$$t_{ascut} = C_t \cdot \frac{V_{ob}}{a_p \cdot f_n \cdot v_c} \quad (7-48)$$

který je znám z kapitoly Obecný proces 7.2.

Při soustružení na konvenčním soustruhu, při upichovacích operacích nebo při soustružení malých průměrů na CNC soustruhu, kde limity stroje brání dalšímu zvýšení otáček, je nutné vztah 7-47 zobecnit na:

$$T_p = \int_0^{\tau} \left(\frac{C_v}{a_p(t)^{x_v} \cdot f_n(t)^{y_v} \cdot v_c(t)} \right)^{-m} dt \quad (7-49)$$

Pro častý případ soustružení při konstantních otáčkách a konstantních veličinách a_p a f_n lze integrál vyřešit:

$$\begin{aligned} T_p &= \left(\frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v}} \right)^{-m} \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{v_c(t)} \right)^{-m} dt \\ &= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v}}{C_v} \right)^m \int_0^{\tau} v_c(t)^m dt \end{aligned} \quad (7-50)$$

Závislost řezné rychlosti na čase lze vyjádřit pomocí vzorce 7-19. Dosazením lze dostat závislost na obráběném průměru:

$$\begin{aligned} T_p &= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v}}{C_v} \right)^m \int_0^{\tau} \left(\frac{n \cdot \pi \cdot d(t)}{1000} \right)^m dt \\ &= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{1000 \cdot C_v} \right)^m \int_0^{\tau} d(t)^m dt \end{aligned} \quad (7-51)$$

Zbývá určit závislost průměru na čase. Díky poznatkům z kapitoly 7.3.2 je již znám vztah pro závislost soustružené plochy v režimu konstantních otáček na čase. Ze vztahu vyplývá, že čas je přímo úměrný ploše a není závislý na soustruženém průměru.

$$t_{ascut} = \frac{S_{ob}}{n \cdot a_p \cdot f_n} \quad (7-52)$$

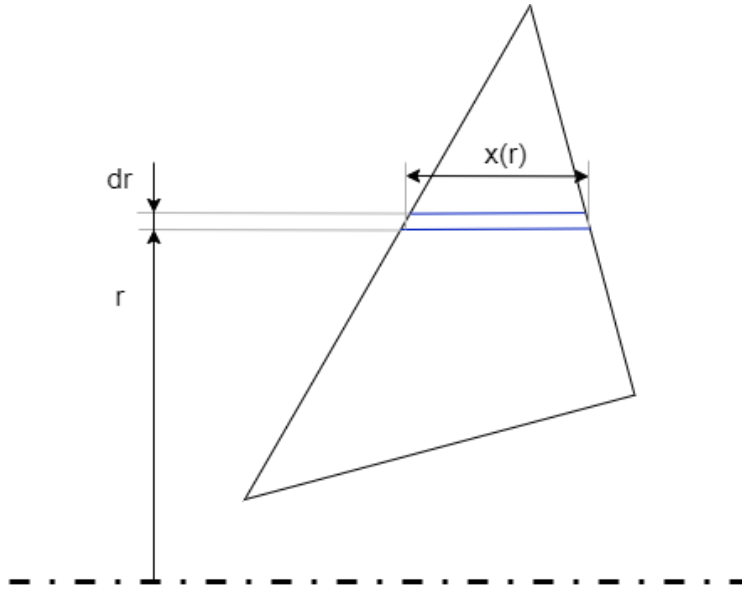
Za čas t lze tedy obrobit plochu o velikosti

$$S(t) = \frac{t \cdot S_{ob}}{t_{ascut}} = t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n \quad (7-53)$$

Za předpokladu, že je obsah S_{ob} definovaný trojúhelníkem, lze popsat závislost plochy na průměru následujícím způsobem:

$$S(r) = \int_0^r x(R) dR \quad , \quad (7-54)$$

kde $x(R)$ značí šířku odebírané vrstvy na průměru R , tak jak ukazuje obrázek 7.5.



Obrázek 7.5: Průběh šířky odebírané vrstvy z trojúhelníkové části obráběné plochy

Závislost $x(r)$ lze odvodit následovně. Body trojúhelníku definujícího S_{ob} jsou seřazeny podle jejich vzdáleností od osy vřetene vzestupně.

$$\mathbf{B}_{\Delta_{ob}} = (B_{n1}, B_{n2}, B_{n3}); B_{ni} \in \mathbf{B}_n; y_{B_{vi}} < y_{B_{vj}} \quad (7-55)$$

pro $\forall(i, j): i < j; i, j \in N \cap \langle 1, n \rangle$

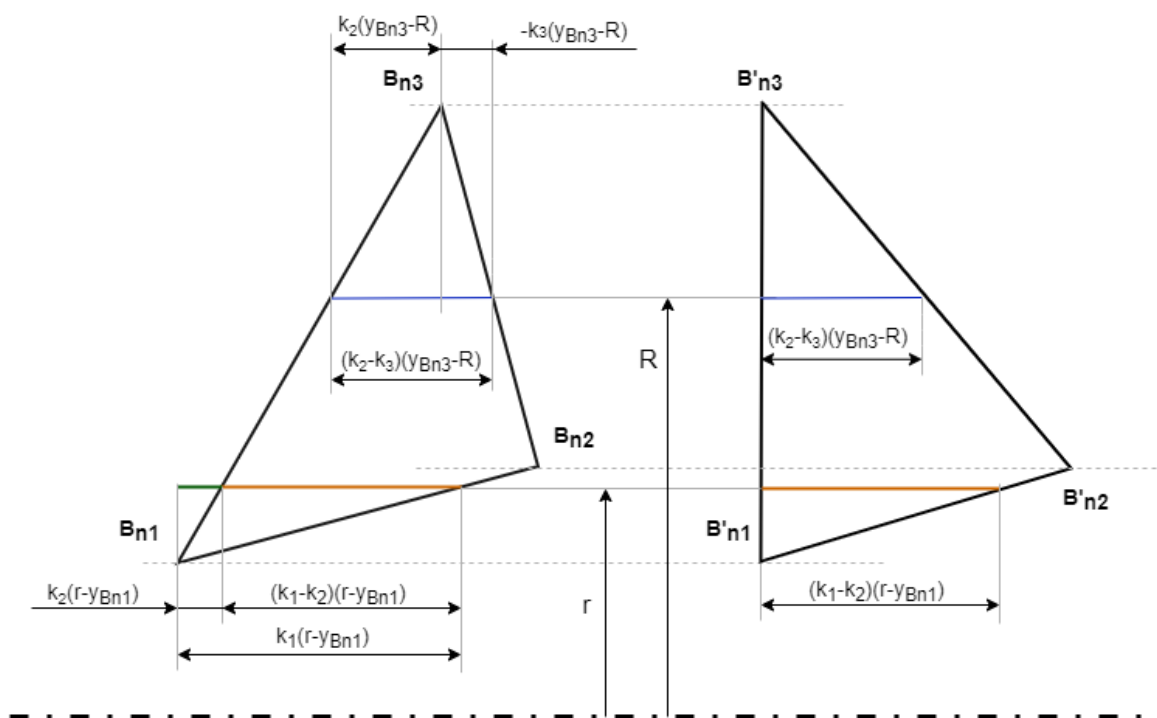
Jsou určeny směrnice vektorů $B_{n1}B_{n2}$, $B_{n1}B_{n3}$ a $B_{n2}B_{n3}$ s označením k_1 , k_2 , resp. k_3

$$k_1 = \frac{x_{B_{n2}} - x_{B_{n1}}}{y_{B_{n2}} - y_{B_{n1}}}$$

$$k_2 = \frac{x_{B_{n3}} - x_{B_{n1}}}{y_{B_{n3}} - y_{B_{n1}}} \quad (7-56)$$

$$k_3 = \frac{x_{B_{n3}} - x_{B_{n2}}}{y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}}}$$

Z obrázku 7.6 je patrná transformace trojúhelníku $\Delta B_{n1}B_{n2}B_{n3}$ na trojúhelník $\Delta B'_{n1}B'_{n2}B'_{n3}$, který má jednu svou stranu rovnoběžnou s osou y a zároveň má stejný průběh šířky $x(r)$.



Obrázek 7.6: Transformace trojúhelníku

Rovnici pro $x(r)$ lze po transformaci trojúhelníku vyvodit z obrázku a je tedy dána vztahem

$$x(r) = \begin{cases} |k_1 - k_2| \cdot (r - y_{B_{n1}}), & r \in \langle y_{B_{n1}}, y_{B_{n2}} \rangle \\ |k_2 - k_3| \cdot (y_{B_{n3}} - r), & r \in \langle y_{B_{n2}}, y_{B_{n3}} \rangle \end{cases} \quad (7-57)$$

Vztah pro $r(t)$ je nyní možné plně definovat spojením vztahů pro $S(r)$ a $S(t)$ jako

$$t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n = \int_0^r x(R) dR \quad (7-58)$$

Pro jednoduchost jsou další výpočty rozděleny pro část 1 a 2 podle vztahu 7-57. Pro každou část je čas integrován od nuly.

Pro část 1 lze odvodit poměrně jednoduchý vztah:

$$\begin{aligned}
 t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n &= \int_{y_{B_{n1}}}^r |k_1 - k_2| \cdot (R - y_{B_{n1}}) dR = \left. \begin{array}{l} R - y_{B_{n1}} = \Delta r \\ dR = d\Delta r \\ \Delta r(y_{B_{n1}}) = 0 \\ \Delta r(r) = r - y_{B_{n1}} \end{array} \right| \\
 &= |k_1 - k_2| \cdot \int_0^{r-y_{B_{n1}}} \Delta r d\Delta r = |k_1 - k_2| \cdot \frac{(r - y_{B_{n1}})^2}{2} \\
 \frac{2 \cdot t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}{|k_1 - k_2|} &= (r - y_{B_{n1}})^2 \\
 r &= \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}{|k_1 - k_2|}} + y_{B_{n1}}; r \in \langle y_{B_{n1}}, y_{B_{n2}} \rangle
 \end{aligned} \tag{7-59}$$

Pro druhý interval $r \in \langle y_{B_{n2}}, y_{B_{n3}} \rangle$ lze analogicky dostat

$$\begin{aligned}
 t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n &= \int_{y_{B_{n2}}}^r |k_2 - k_3| \cdot (y_{B_{n3}} - R) dR = \left. \begin{array}{l} y_{B_{n3}} - R = \Delta r \\ dR = -d\Delta r \\ \Delta r(y_{B_{n2}}) = y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}} \\ \Delta r(r) = y_{B_{n3}} - r \end{array} \right| \\
 &= -|k_2 - k_3| \cdot \int_{y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}}}^{y_{B_{n3}} - r} \Delta r d\Delta r \\
 &= -|k_2 - k_3| \cdot \left[\frac{(y_{B_{n3}} - r)^2}{2} - \frac{(y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}})^2}{2} \right] \\
 (y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}})^2 - \frac{2 \cdot t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}{|k_2 - k_3|} &= (y_{B_{n3}} - r)^2 \\
 r &= -\sqrt{(y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}})^2 - \frac{2 \cdot t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}{|k_2 - k_3|}} + y_{B_{n3}}; r \in \langle y_{B_{n2}}, y_{B_{n3}} \rangle
 \end{aligned} \tag{7-60}$$

Zbývá dosadit zjištěné závislosti $r(t)$ do vztahu 7-51. Pro část 1 lze odvodit

$$\begin{aligned}
T_{pi_1} &= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{1000 \cdot C_v} \right)^m \int_0^{\tau_1} d(t)^m dt = \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{500 \cdot C_v} \right)^m \int_0^{\tau_1} r(t)^m dt \\
&= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{500 \cdot C_v} \right)^m \int_0^{\tau_1} \left(\sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}{|k_1 - k_2|}} + y_{B_{n1}} \right)^m dt \\
&= \left[\begin{array}{l} k_{11} = \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{500 \cdot C_v} \right)^m \\ k_{12} = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}{|k_1 - k_2|}} \end{array} \right] = k_{11} \int_0^{\tau_1} (k_{12} \sqrt{t} + y_{B_{n1}})^m dt \\
&= 2k_{11} \left[\frac{(k_{12} \sqrt{t} + y_{B_{n1}})^{m+1} \cdot (k_{12}(m+1)\sqrt{t} - y_{B_{n1}})}{k_{12}^2 (m+1)(m+2)} \right]_0^{\tau_1}.
\end{aligned} \tag{7-61}$$

Pro část 2 lze analogicky dospět k výrazu

$$\begin{aligned}
T_{pi_2} &= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{1000 \cdot C_v} \right)^m \int_0^{\tau_2} d(t)^m dt = \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{500 \cdot C_v} \right)^m \int_0^{\tau_2} r(t)^m dt \\
&= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{500 \cdot C_v} \right)^m \int_0^{\tau_2} \left(-\sqrt{(y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}})^2 - \frac{2 \cdot t \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}{|k_2 - k_3|}} + y_{B_{n3}} \right)^m dt \\
&= \left[\begin{array}{l} k_{21} = \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{500 \cdot C_v} \right)^m \\ k_{22} = -\frac{2 \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}{|k_2 - k_3|} \\ k_{23} = (y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}})^2 \end{array} \right] = k_{21} \int_0^{\tau_2} (-\sqrt{k_{23} + k_{22}t} + y_{B_{n3}})^m dt \\
&= -2k_{21} \left[\frac{(y_{B_{n3}} - \sqrt{k_{23} + k_{22}t})^{m+1} \cdot ((m+1)\sqrt{k_{23} + k_{22}t} + y_{B_{n3}})}{k_{22}(m+1)(m+2)} \right]_0^{\tau_2}.
\end{aligned} \tag{7-62}$$

Nyní zbývá určit hodnoty časů τ_1 a τ_2 , které představují celkovou dobu teoreticky potřebnou k obrobení částí 1, resp. 2. Strojní čas nástroje v řezu t_{AScut} v režimu s konstantními otáčkami byl již odvozen v kapitole 7.3.2. Pro tento případ rovnice 7-33 nabyde tvaru

$$\tau_1 = \frac{S_1}{n \cdot a_p \cdot f_n} = \frac{|k_1 - k_2| \cdot (y_{B_{n2}} - y_{B_{n1}})^2}{2 \cdot n \cdot a_p \cdot f_n},$$

$$\tau_2 = \frac{S_2}{n \cdot a_p \cdot f_n} = \frac{|k_2 - k_3| \cdot (y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}})^2}{2 \cdot n \cdot a_p \cdot f_n}.$$
(7-63)

Dosazením za časy τ_1 a τ_2 do rovnic 7-61 a 7-62 se vztah pro poměrnou spotřebu trvanlivosti dále zjednoduší na

$$T_{pi_1} = 2k_{11} \left[\frac{(y_{B_{n2}})^{m+1} \cdot (y_{B_{n2}} - y_{B_{n1}})(m+1) - y_{B_{n1}}}{k_{12}^2(m+1)(m+2)} - \frac{(y_{B_{n1}})^{m+1} \cdot (-2y_{B_{n1}})}{k_{12}^2(m+1)(m+2)} \right]$$

$$= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{500 \cdot C_v} \right)^m \cdot \frac{|k_1 - k_2|}{n \cdot a_p \cdot f_n}$$

$$\cdot \frac{(y_{B_{n2}})^{m+1} \cdot (y_{B_{n2}}(m+1) - y_{B_{n1}}(m+2)) + (y_{B_{n1}})^{m+2}}{(m+1)(m+2)}$$

$$T_{pi_2} = -2k_{21} \left[\frac{(y_{B_{n3}} - \sqrt{k_{23} + k_{22}\tau_2})^{m+1} \cdot ((m+1)\sqrt{k_{23} + k_{22}\tau_2} + y_{B_{n3}})}{k_{22}(m+1)(m+2)} \right.$$

$$\left. - \frac{(y_{B_{n3}} - \sqrt{k_{23}})^{m+1} \cdot ((m+1)\sqrt{k_{23}} + y_{B_{n3}})}{k_{22}(m+1)(m+2)} \right]$$
(7-64)

$$= -2k_{21} \frac{(y_{B_{n3}})^{m+2} - (y_{B_{n2}})^{m+1} \cdot ((m+1)(y_{B_{n3}} - y_{B_{n2}}) + y_{B_{n3}})}{k_{22}(m+1)(m+2)}$$

$$= \left(\frac{a_p^{x_v} \cdot f_n^{y_v} \cdot n \cdot \pi}{500 \cdot C_v} \right)^m \cdot \frac{|k_2 - k_3|}{n \cdot a_p \cdot f_n}$$

$$\cdot \frac{(y_{B_{n2}})^{m+1} \cdot (y_{B_{n2}}(m+1) - y_{B_{n3}}(m+2)) + (y_{B_{n3}})^{m+2}}{(m+1)(m+2)}$$

Nyní je nutné zjistit celkovou poměrnou spotřebu trvanlivosti T_p nástroje při obrábění výrobku, která je součtem jednotlivých poměrných spotřeb trvanlivostí T_{pi} všech operací prováděných daným nástrojem.

$$T_p = \sum_i T_{pi} = \sum_i (T_{pi_1} + T_{pi_2})$$
(7-65)

7.4.2 Důkaz experimentem

Toto pojetí výpočtu trvanlivosti nástroje pro konstantní otáčky je nevšední a novátorské. V dostupné literatuře se nepodařilo najít žádnou zmínku o podobném přístupu. Jelikož bylo odvození tohoto modelu trvanlivosti poměrně náročné, bude vhodné přesvědčit se o jeho správnosti modelovým příkladem.

Důkaz vychází z porovnání výsledků trvanlivosti při použití odvozeného modelu pro konstantní otáčky s výsledky danými známým komplexním Taylorovým vztahem pro výpočet trvanlivosti při konstantní rychlosti. Aby byly výsledky obou výpočtů porovnatelné, je zvolena operace soustružení tak, aby se řezná rychlost neměnila ani v režimu konstantních otáček. Řezná rychlost je na otáčkách závislá podle již známého vztahu

$$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot d}{1000} . \quad (7-66)$$

Jedinou proměnnou tohoto vztahu je soustružený průměr d . Aby byla řezná rychlost co nejvíce konstantní, je nutné proměnnou d omezit úzkým intervalem.

Při soustružení limitně tenké válcové plochy by tedy měl model pro konstantní otáčky vřetene dávat téměř stejny výsledky jako již dříve známý model pro konstantní řeznou rychlost.

Nastavení provedených experimentů shrnuje následující tabulka. Hodnoty odpovídají obvodovému soustružení válce z průměru d_{max} na průměr d_{min} .

d_{min} [mm]	d_{max} [mm]	Taylor. koef.				v_c [m/min]	n [ot/min] $\left(n = \frac{2000 \cdot \pi \cdot v_c}{d_{min} + d_{max}} \right)$	Trvanlivost ($v_c = \text{konst.}$)	Trvanlivost ($n = \text{konst.}$)	Relativní rozdíl
		C_v	m	x_v	y_v					
10	20	38	7	0.1	0.4	40	848,826	63,27	33,91	46,4 %
50	60						231,498		59,78	5,5 %
100	110						121,261		62,28	1,6 %
200	201	50	4	0.2	0.6	50	79,38	47,59	47,59	0 %

Tabulka 7.1: Výsledky experimentálního důkazu odvozeného vztahu pro trvanlivost nástroje

Z experimentu vyplývá, že čím je poměr tloušťky odebírané vrstvy ku obráběnému průměru menší, tím je menší i relativní rozdíl mezi trvanlivostmi nástroje danými oběma modely. Při odebrání velice tenké válcové vrstvy dávají oba modely skutečně stejny výsledky.

7.4.3 Náklady na trvanlivost

Pro určení nákladů nástroje za dobu jeho trvanlivosti je nutné rozlišit nástroje monolitní a nástroje s výměnnými břitovými destičkami.

7.4.3.1 Monolitní nástroje

Monolitní nástroje jsou většinou cenově dostupnější než nástroje s výměnnými břitovými destičkami. Jejich nevýhodou je ovšem kratší životnost a obvykle menší dosažitelná řezná rychlost. Pro určení nákladů za životnost je nutné znát vstupní parametry:

- cena nástroje p_n ,
- zbytková cena nástroje p_{nz} (záporná hodnota značí náklady na likvidaci),
- počet možných přestřehů z_o ,
- náklady jednoho přestřehů N_o .

Náklady za životnost N_z lze spočítat pomocí vztahu

$$N_z = p_n + z_o \cdot N_o - p_{nz} \quad . \quad (7-67)$$

Užitečnější veličinou v kontextu dalších výpočtů jsou náklady nástroje na jednu trvanlivost břitu N_t dané vztahem

$$N_t = \frac{N_z}{z_o + 1} = \frac{p_n + z_o \cdot N_o - p_{nz}}{z_o + 1} \quad . \quad (7-68)$$

7.4.3.2 Nástroje s výměnitelnými břitovými destičkami

Nástroje s výměnitelnými břitovými destičkami (VBD) nelze kvůli povlakům na destičce přestřehovat. Většina břitových destiček ovšem disponuje několika břity. Po opotřebením lze destičku v nástroji přepnout a využít pro obrábění další břit. U nástroje s VBD je nutné znát tyto vstupní parametry:

- cena těla nástroje p_n ,
- zbytková cena těla nástroje p_{nz} ,
- cena břitové destičky p_{VBD} ,
- počet VBD na nástroji z ,
- počet břitů na VBD z_b ,
- životnost těla nástroje vyjádřená počtem upnutí VBD z_u .

Náklady za životnost nástroje udává rovnice

$$N_z = p_n + z_u \cdot z \cdot \frac{p_{VBD}}{z_b} - p_{nz} \quad . \quad (7-69)$$

Náklady na trvanlivost jednoho břitu zjistíme podělením nákladů na životnost počtem upnutí, které nástroj vydrží.

$$N_t = \frac{N_z}{z_u} = \frac{p_n - p_{nz}}{z_u} + z \cdot \frac{p_{VBD}}{z_b} \quad . \quad (7-70)$$

7.4.4 Náklady na operaci

V kapitole 7.4.1 byl odvozen vztah pro výpočet celkové poměrné spotřeby trvanlivosti, kterou lze chápat jako podíl trvanlivosti na operaci $T_p = [\text{trvanlivost/operace}]$. Výpočet nákladů na operaci N_{nasOp} je tedy při znalosti nákladů na trvanlivost triviální.

$$N_{nasOp} = N_t \cdot T_p \quad (7-71)$$

7.4.5 Hodinová nákladová sazba

Hodinovou nákladovou sazbu lze spočítat z nákladů na operaci pomocí znalosti časového trvání dané operace.

$$HNS_N = \frac{N_{op}}{t_o} \quad (7-72)$$

Hodinová nákladová sazba je vypočítána ze strojního času. Předpokladem je, že je stroj s nástrojem blokován po celou dobu trvání operace.

Hodinová nákladová sazba není dále v modelu využita a může sloužit pouze jako informativní hodnota pro uživatele systému.

7.5 Náklady stroje

Neustálá zvyšující se komplexnost, a hlavně kvalita vyráběných součástí, nutí výrobce využívat stále přesnější a produktivnější výrobní stroje. S rostoucími nároky na stroje roste i jejich cena, a proto dnes tvoří náklady na stroj majoritní část nákladů výrobku.

Stejně jako v předchozích kapitolách, i pro vyčíslení nákladů strojních zařízení je využit přístup Activity based costing. Pro účely zpřehlednění výpočtu jsou náklady rozděleny do dvou kategorií na variabilní a fixní.

7.5.1 Variabilní náklady stroje

Variabilní náklady jsou ze své definice závislé na vyráběném množství. V kontextu výrobních zařízení se jedná zejména o náklady na energie a náklady na řeznou kapalinu.

7.5.1.1 Náklady na energie

Pro výpočet nákladů na energie je potřeba znát cenu elektrické energie, která může být v delším časovém období proměnlivá, a proto je jedním ze vstupů do systému AMCO, Spotřeba elektrické energie se bude lišit podle řezných podmínek. Obrábění houževnatějších materiálů a větší průřez třísky povedou k větší spotřebě energie. Naopak ve chvílích, kdy nebude nástroj v řezu, bude stroj odebírat energie podstatně méně. Model popisující spotřebu stroje proto pracuje se 3 režimy použití stroje.

1. Standby

Stroj je zapnut, ale není na něm prováděna žádná operace vyžadující pohyb vřetene nebo nástroje. V tomto režimu se bude stroj nacházet při operacích jako je výměna obrobků, výměna nástrojů, nastavení výrobního programu atd. Spotřeba energie v režimu standby je dána konstantou $P_{standby} = [\text{kW}]$.

2. Cutting

Tento režim popisuje spotřebu elektrické energie během samotného obrábění. Jak již bylo zmíněno, spotřeba elektrické energie bude v reálných podmínkách záviset na řezných podmínkách a materiálových vlastnostech. Pro účely programu ovšem postačí uvažovat hodnotu konstantní $P_{cutting} = [\text{kW}]$, kterou k danému stroji přiřadí pracovník pomocí kvalifikovaného odhadu jako průměrnou spotřebu elektrické energie během obráběcího procesu.

3. Shifting

Během posuvů a přejezdů nástroje, kdy není nástroj v řezu, ale vřeteno stroje se točí, odebírá stroj více energie než v režimu standby. Režim shifting je v nákladovém modelu použit na dobu, která odpovídá strojnímu času zbaveného o čas samotného obrábění a jeho energetickou spotřebu popisuje veličina $P_{shifting} = [\text{kW}]$.

Celkovou spotřebu elektrické energie E_E ($E_E = [\text{kWh/kus}]$) během dané výrobní operace popisuje vztah

$$E_E = \left(\frac{P_{standby} \cdot t_i + P_{cutting} \cdot t_{ascut} + P_{shifting} \cdot t_{transfer}}{60} \right) . \quad (7-73)$$

Význam časů t_i , t_{ascut} a $t_{transfer}$ byl vysvětlen v kapitole 7.1.

Náklady na operaci jsou vypočteny ze spotřeby energetické energie pomocí vztahu

$$N_{enOp} = E_E \cdot p_E \quad , \quad (7-74)$$

kde p_E značí cenu elektrické energie v Kč/kWh.

7.5.1.2 Náklady na řeznou kapalinu

Moderní obráběcí stroje pracující při relativně vyšších řezných rychlostech využívají řeznou kapalinu jako chladicí médium. Chlazením nástroje klesá tempo jeho opotřebování a roste trvanlivost nástroje. I když kapalina ve stroji cirkuluje je třeba ji pravidelně měnit a doplňovat. Kapalina je spotřebovávána kvůli jejímu ulpívání na obrobku. Kapalina po čase degraduje a ztrácí své původní vlastnosti, proto je potřeba ji přibližně jednou ročně vyměnit.

Roční náklady na řeznou kapalinu lze přibližně určit jako

$$N_{rk} = N_{con} + N_{lik} + N_{čis} \quad . \quad (7-75)$$

Náklady na pořízení koncentráту řezné kapaliny N_{con} jsou ještě doplněny o roční náklady na likvidaci N_{lik} a čištění řezné kapaliny $N_{čis}$. Náklady na pořízení koncentráту lze dále vyjádřit jako

$$N_{con} = p_{con} \cdot c_{con} \cdot Q \quad , \quad (7-76)$$

kde p_{con} značí cenu za litr koncentráту, c_{con} je používaná koncentrace řezné kapaliny a Q udává roční spotřebu řezné kapaliny.

Hodinové náklady na řeznou kapalinu lze získat podělením ročních nákladů efektivně využitou kapacitou stroje KAP_{ef_stroj} . Výsledný vztah pro hodinovou nákladovou sazbu poté nabývá tvaru

$$HNS_{kap} = \frac{N_{rk}}{KAP_{ef_stroj}} = \frac{p_{con} \cdot c_{con} \cdot Q + N_{lik} + N_{čis}}{KAP_{ef_stroj}} \quad . \quad (7-77)$$

Náklady na řeznou kapalinu pro danou operaci jsou spočítány na základě času celé operace podle vztahu

$$N_{kapOp} = HNS_{kap} \cdot t_o \quad . \quad (7-78)$$

7.5.2 Fixní náklady stroje

Fixní náklady stroje nezávisí přímo úměrně na objemu produkce. K přiřazení fixních nákladů na danou operaci bude nutné určit hodinovou nákladovou sazbu těchto nákladů na základě kapacity daného stroje. Mezi fixní náklady patří především odpisy, finanční náklady, náklady

pojištění, náklady na údržbu stroje a náklady na prostor. Náklady na obsluhu jsou od nákladu stroje osamostatněny a bude jim věnována samostatná kapitola.

7.5.2.1 Odpisy

Odpisy jsou obvykle největší položkou fixních nákladů stroje. Odpisy odráží klesající hodnotu ceny strojního zařízení. Pořizovací cena stroje je tak rozložena na životnost daného stroje. Pro účely odhadu skutečných nákladů daného stroje bude počítáno s manažerskými odpisy, které nejsou narozdíl od odpisů účetních stanoveny zákonem. Výše manažerských odpisů proto může být nastavena tak, aby co nejlépe modelovala skutečnou klesající hodnotu zařízení.

Životnost zařízení je omezena nejen jeho fyzickým stavem, ale také zastaralostí použité technologie. Potřeba obnovy strojního zařízení proto často není vynucena fyzickým opotřebením stroje, ale nutností inovovat technologický postup z důvodu udržení konkurenceschopnosti.

Roční odpisy strojního zařízení lze spočítat vydělením pořizovací ceny stroje p_{str} dobou odepisování T_{str} .

$$ODP = \frac{p_{str}}{T_{str}} \quad (7-79)$$

7.5.2.2 Finanční náklady

Finanční náklady představují další náklady spojené s pořízením strojního zařízení. Jsou to náklady spojené s koupí stroje na úvěr, jedná se tedy o úroky a případně další poplatky s úvěrem spojené.

7.5.2.3 Náklady pojištění

Náklady pojištění jsou jednou ze vstupních položek modelu. Náklady pojištění se běžně odvíjí od ceny strojního zařízení, do modelu se ovšem zadávají v absolutní hodnotě ve formě ročních nákladů.

7.5.2.4 Náklady na údržbu

K vyčíslení nákladů na údržbu je často zapotřebí znalost historických dat o údržbě daného stroje nebo alespoň stroje podobného. Do těchto nákladů spadají jak náklady na preventivní údržbu, tak i odhad nákladů na opravu poruch.

7.5.2.5 Náklady prostoru

Filozofií kalkulační metody Activity based costing je alokace co největšího objemu nákladů dané aktivitě, pokud to povaha daného nákladu umožní. I když jsou náklady na prostor často

řazeny do režijních nákladů, lze je dané aktivitě přiřadit na základě znalosti velikosti plochy, kterou aktivita využívá. Náklady na prostor daného zařízení lze tedy určit jako součin využití plochy daného zařízení včetně prostoru pro obsluhu s roční nákladovou sazbou na jednotku této plochy p_s .

$$N_{plocha} = S_v \cdot p_s \quad (7-80)$$

Náklady plochy v sobě zahrnují odpisy nebo nájem budovy, náklady spojené s úklidem, ostrahou, či energiemi na vytápění a svícení.

7.5.3 Kapacita strojního zařízení

Pro určení využití kapacity stroje bude nejprve spočítán disponibilní časový fond. Disponibilní časový fond představuje teoreticky využitelnou část nominálního časového fondu. Nominální časový fond se odvíjí od směnnosti provozu a počtu svátků v daném roce, hodnoty nominálního časového fondu jsou shrnuty v tabulce 7.2.

Počet směn	Nominální časový fond [hod/rok]
1	2000
2	4000
3	6000

Tabulka 7.2: Časový fond podle směnnosti provozu

Nominální časový fond je potřeba upravit odečtením ročního objemu časů na údržbu ve směně, časů organizačně technických přestávek a odhadované doby neplánovaných oprav. Naopak přičíst je potřeba dobu přesčasů. Tím je získán disponibilní časový fond stroje, který však nemusí být strojem zcela využit. Míra využití fondu závisí na objemu zakázek. Pro správné přiřazení fixních nákladů je nutné počítat s efektivně využitou kapacitou KAP_{ef} , kterou lze odhadnout vynásobením disponibilního fondu koeficientem využití disponibilní kapacity. Hodnotu tohoto koeficientu lze určit na základě historických dat nebo srovnáním s podobným pracovištěm.

7.5.4 Hodinová nákladová sazba

Hodinovou nákladovou sazbu fixních nákladů stroje lze určit jako podíl sumy fixních nákladů stroje a efektivně využití kapacity.

$$\begin{aligned}
 HNS_{Fstr} &= \frac{N_{str}}{KAP_{ef_stroj}} \\
 &= \frac{N_{plocha} + ODP + N_{fin} + N_{údržba} + N_{poj}}{KAP_{ef_stroj}}
 \end{aligned}
 \tag{7-81}$$

7.5.5 Náklady na operaci

Je nutné si uvědomit, že strojní zařízení je blokováno daným výrobkem přibližně po celou dobu operace, a nikoliv jen pod dobu, kterou udává strojní čas t_{AS} . Z tohoto důvodu je vhodnější alokovat strojní náklady na základě celkového času operace.

Pokud je hodinová nákladová sazba vynásobena časem dané operace, lze získat náklady stroje na danou operaci.

$$N_{strOp} = HNS_{Fstr} \cdot t_o \quad . \tag{7-82}$$

7.6 Náklady na obsluhu

Náklady na obsluhu jsou odtrženy od výpočtu nákladů na stroj. Model proto umožňuje přiřazení jiné kapacity obsluze a strojnímu zařízení. Tento přístup dovoluje popsat situace, kdy obsluha čerpá pracovní volno, ale stroj je pořád v provozu díky jinému pracovníkovi. Naopak, pokud je například stroj opravován, může být obsluha stroje přiřazena dočasně na jiné pracoviště, kde může tvořit přidanou hodnotu. Program umožňuje vyplnit kapacitu stroje i obsluhy stejnými daty a tím simulovat situaci, kdy je obsluha pevně spjata s daným zařízením. V takovém případě by se náklady obsluhy chovaly jako složka nákladů stroje.

Hlavními náklady obsluhy jsou mzdové náklady, odměny, příplatky za práce přesčas a další roční náklady spojené s obsluhou jako mohou být náklady na školení, na ochranné a pracovní pomůcky, na občerstvení apod.

Hodinová nákladová sazba obsluhy je poté určena vztahem

$$HNS_{obs} = \frac{N_{obs}}{KAP_{ef_obs}} = \frac{N_{mzda} + N_{přesčasy} + N_{odměny} + N_{ostatní}}{KAP_{ef_obs}} \quad . \tag{7-83}$$

Mzdové náklady jsou počítány na základě zadané hrubé mzdy a 33,8% přírážky na pokrytí sociálních a zdravotních odvodů zaměstnavatele.

$$N_{mzda} = 12 \cdot Hrubá_mzda \cdot 1,338 \tag{7-84}$$

Náklady přesčasů lze vyjádřit jako

$$N_{přesčas} = (12 \cdot Hrubá_mzda \cdot 1,338) \cdot \left(1 + \frac{p_{přesčas}}{100}\right) \cdot \frac{t_{přesčas}}{KAP_{ef\ obsluha}}, \quad (7-85)$$

kde $t_{přesčas}$ je objem přesčasů v daném roce, $p_{přesčas}$ je procentuální přírůžka za práci přesčas.

Za předpokladu, že je opět obsluha blokována danou operací po celou dobu operace, lze určit výši nákladů na obsluhu připadající na danou operaci jako

$$N_{obsOp} = HNS_{obs} \cdot t_o \quad (7-86)$$

7.7 Režijní náklady

Jak již bylo postulováno v rešeršní části práce, absence složky režijních nákladů sice odstraňuje nepřesnosti vzniklé způsobem jejich alokace, nicméně posouvá zjištěné optimum režijních podmínek do oblasti delších strojních časů.

Význam režijních nákladů závisí na povaze výroby a podniku, optimální postup výpočtu přírůžky režijních nákladů se bude také lišit. Proto program pracuje pouze s veličinou hodinová režijní sazba podniku (HRS_p), která zastupuje vliv všech doposud nezapočítaných režijních nákladů, jako jsou náklady spojené s logistikou, propagací, skladováním nebo řízením podniku. Určení velikosti HRS_p je plně v rukou uživatele programu. Výše HRS_p může být stanovena například podělením celkové sumy režijních nákladů sumou efektivně využitých kapacit všech strojních zařízení.

Přirazení režijních nákladů na danou operaci se řídí vztahem

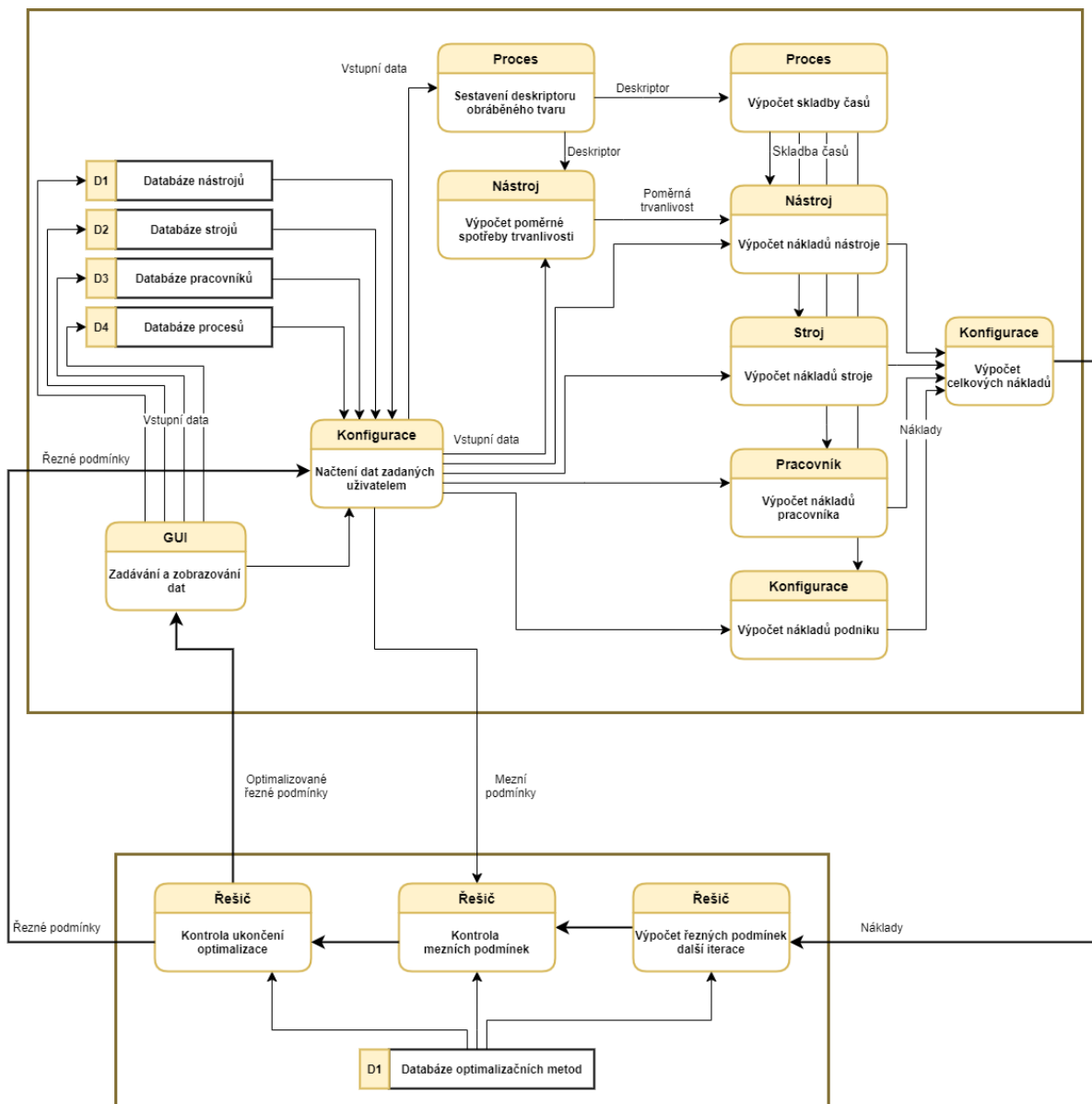
$$N_{podOp} = HRS_p \cdot t_o \quad (7-87)$$

Celkové náklady, které jsou použity jako optimalizační kritérium, jsou určeny součtem dílčích nákladových položek, kterým se věnovaly předchozí kapitoly

$$N = N_{podOp} + N_{obsOp} + N_{strOp} + N_{enOp} + N_{kapOp} + N_{nasOp} \quad (7-88)$$

8 Analýza vnitřní struktury programu

Jak již bylo řečeno, program AMCO je napsán v jazyce python [32] s využitím knihovny PyQt5 [33] pro tvorbu grafického rozhraní (GUI). Základní schéma vnitřní struktury programu je vyjádřeno pomocí zjednodušeného diagramu datových toků.



Obrázek 8.1: Diagram datových toků

V hlavičce každého procesu je uvedena programová třída, která za daný proces zodpovídá. Jádrem celého programu je třída Konfigurace (v kódu programu angl. Configuration). Tato třída je typu singleton (tedy existuje její jediná instance) a propojuje ostatní objekty. Dalším významným stavebním kamenem je grafické uživatelské rozhraní, které je v kódu zastoupeno celou řadou tříd, které jsou v diagramu souhrnně reprezentovány zkratkou GUI. GUI se stará

především o přesun dat mezi uživatelem a třídou Konfigurace. Při spuštění základního výpočtu celkových nákladů třída konfigurace obsluhuje uživatelem vybrané objekty tříd Stroj, Nástroj, Proces a Pracovník potřebnými daty a získává hodnoty dílčích složek nákladů. Objekty navíc získávají data o skladbě časů z třídy Proces. Jak bylo popsáno v kapitole 7, jsou tyto časy pro výpočet nákladů potřeba.

Třída Proces má mezi ostatními objekty zvláštní postavení. Při výpočtu nákladů třída Proces nejprve vygeneruje deskriptor obráběného tvaru, který slouží pro výpočet strojního času a pro určení trvanlivosti nástroje. Deskriptor je objekt typu slovník, který obsahuje souřadnice bodů, kterými jsou definovány jednotlivé trojúhelníky, z kterých se obráběný tvar skládá. V případě, že je vybrán *obecný proces*, obsahuje deskriptor pouze hodnotu obráběného objemu.

Nezávislý modul reprezentovaný třídou Řešič (v kódu programu angl. Solver) je schopen měnit některá vstupní data (jmenovitě řezné podmínky) třídy Konfigurace a získávat informaci o skladbě nákladů. Při optimalizaci Řešič iterativně mění vstupy modelu a vyhodnocuje jeho výstupy, dokud není splněna podmínka ukončení optimalizace, v takovém případě jsou výsledky optimalizace zobrazeny v GUI.

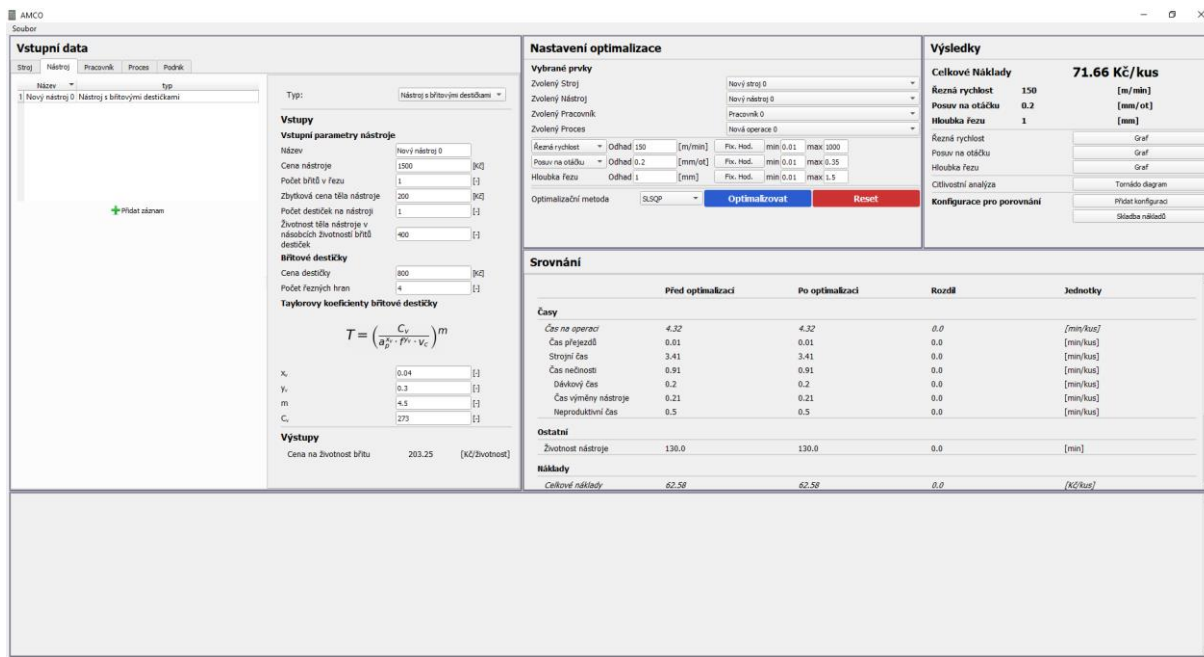
Třída Řešič využívá knihovnu SciPy [34] jako databázi již vytvořených optimalizačních algoritmů. Vybrané metody je ovšem nutné správně nakonfigurovat pomocí změny některých parametrů. Tyto parametry lze měnit pouze ve zdrojovém kódu programu a uživatel k nim nemá přístup. Optimalizační metody knihovny SciPy jsou napsány v nižších programovacích jazycích, jsou proto efektivnější, než by byly metody naprogramované v jazyce Python.

K úplnému popsání a zdokumentování programu AMCO dle standardů metodiky UML by bylo zapotřebí desítek podobných diagramů na různých úrovních procesů programu. Cílem této kapitoly bylo však jen nastínit uživateli základní architekturu a koncepci programového řešení. Podrobně je program popsán v programové dokumentaci vyhotovené dle *python coding standard* [32]. Zdrojový kód s dokumentací je k dispozici kvůli značnému rozsahu kódu (bez mála 5000 řádků) jen v elektronické příloze této práce.

9 Grafické uživatelské rozhraní (GUI)

Grafické rozhraní bylo naprogramováno pomocí nástrojů knihovny PyQt5. Tato knihovna umožňuje pokročilou práci multithreadingu a vytváření signálů pro komunikaci mezi jednotlivými procesy programu.

9.1 Základní popis GUI



Obrázek 9.1: Program AMCO

GUI je rozdělena na 5 základních sekcí. V horní části jsou horizontálně řazeny 3 panely: *Vstupní data*, *Nastavení optimalizace* a *Výsledky*. Pod panely *Nastavení optimalizace* a *Výsledky* se nachází panel s tabulkovým srovnáním výsledků optimalizace. V dolní části se nachází terminál, který v této verzi slouží jen jako textový výstup programu. Do terminálu je taktéž přeměrováno logování programu a jeho standardní i chybový výstup. Z terminálu je tedy možné vyčíst chybové hlášky programu, popřípadě důvody jeho špatného fungování. Pro koncového uživatele nemá terminál takový význam jako pro vývojáře, kterému by měl zjednodušit proces ladění programu.

Významy dalších panelů jsou vysvětleny v dalších podkapitolách. V průběhu používání programu by měl uživatel postupovat v pořadí, v jakém budou jednotlivé panely a funkce představeny. Jednotlivé moduly programu jsou ovšem spojeny paralelně, proto je možné se k jednotlivým nastavením vracet a měnit již dříve zadané hodnoty.

Stav programu, tedy alespoň jeho nastavení a vstupní data, lze kdykoliv uložit nebo načíst. K této funkci se lze dostat přes rozbalovací menu soubor v levé horní části okna.

Program také podporuje několik klávesových zkratk:

- CTRL + 0 Načtení konfigurace
- CTRL + S Uložení konfigurace
- CTRL + SHIFT + S Uložení konfigurace a výběr místa uložení
- CTRL + Q Ukončení programu

9.2 Vstupní data

Panel se vstupními daty je rozdělen na 5 záložek, které lze vyplňovat v libovolném pořadí. Jsou to záložky obsahující vstupy pro stroj, nástroj, pracovníka, proces a podnik.

Všechny záložky, kromě záložky *Podnik*, obsahují v levé části seznam již definovaných konfigurací pro danou záložku, v pravé části potom samotnou část pro zadávání vstupních dat ve formě formuláře. Přidat novou konfiguraci, tedy nový stroj, nástroj, proces nebo pracovníka obsluhy, lze pomocí kliknutí na tlačítko **+ Přidat záznam** ve spodní části seznamu definovaných konfigurací. Definovanou konfiguraci lze ze seznamu odstranit po kliknutí pravým tlačítkem myši na danou položku a výběrem možnosti „Odstranit“ z kontextové nabídky.

Název	HNS
1 CNC soustruh	350.51
2 konvenční soustruh	109.5
3 konvenční soustruh 2	109.5

Název	CNC soustruh
Cena stroje	1750000 [Kč]
Doba odepisování	7 [rok]
Spotřeba energie	
při nečinnosti	1.8 [kW]
při řezu	4.6 [kW]
při přejezdech	2.5 [kW]
Maximální otáčky vřetene	5000 [ot/min]

Obrázek 9.2: Sekce 'vstupní data' programu AMCO

Po kliknutí na danou konfiguraci levým tlačítkem myši, se nastavení dané konfigurace objeví v pravé části panelu. Pro úspěšné vložení hodnot do formuláře pro vstupní data je nutné každou zadanou hodnotu potvrdit stisknutím klávesy enter nebo kliknutím myši mimo dané textové pole. Po úspěšném vložení hodnoty automaticky dojde k přepočítání dané části modelu. Vložení

hodnoty ovšem nespustí samotnou optimalizaci, kterou je kvůli její výpočetní náročnosti nutné spustit vždy manuálně.

Pravá část panelu vstupní data obsahuje dále i přehled některých výstupů modelu souvisejících s vybranou záložkou panelu (strojem, nástrojem, pracovníkem, ...).

Lze si povšimnout, že výčet nákladových položek výstupů záložek neobsahuje úplný rozbor všech nákladů. Složky nákladů, které závisí na nastavení procesu nebo řezných podmínkách nejsou ve výstupech panelu obsaženy, protože ke spojení konkrétních prvků a dané kombinace řezných podmínek dochází až v panelu *Nastavení optimalizace*.

9.2.1 Stroj

Záložka *Stroj* umožňuje uživateli specifikovat výčet strojů, se kterými může optimalizace pracovat. Pro každý záznam stroje je nejdříve vhodné upravit název stroje, pod kterým bude stroj přístupný v seznamu definovaných strojů. Dále záložka umožňuje definování nákladových položek, které jsou potřebné k výpočtům v kapitole 7.5.

Vstupy		Výstupy		
Vstupní parametry stroje		Výstupní parametry stroje		
Název	<input type="text" value="Nový stroj 0"/>	Hodinové náklady	335.0	[Kč/hod]
Cena stroje	<input type="text" value="1750000"/> [Kč]	<i>Náklady stroje</i>	328.18	[Kč/hod]
Doba odepisování	<input type="text" value="7"/> [rok]	Odpisy	221.58	[Kč/hod]
Spotřeba energie		Finanční náklady	39.48	[Kč/hod]
Příkon při nečinnosti	<input type="text" value="1.8"/> [kW]	Pojištění	19.74	[Kč/hod]
Příkon při řezu	<input type="text" value="4.6"/> [kW]	Údržba	33.84	[Kč/hod]
Příkon při přejezdech	<input type="text" value="2.5"/> [kW]	Prostor	13.54	[Kč/hod]
Maximální otáčky vřetene	<input type="text" value="5000"/> [ot/min]	Náklady řezné kapaliny	4.77	[Kč/hod]
Údržba	<input type="text" value="60000"/> [Kč/rok]	(Náklady řezné kapaliny)	8460.0	[Kč/rok]
Pojištění	<input type="text" value="35000"/> [Kč/rok]	Náklady na energie	2.05	[Kč/hod]
Finanční náklady	<input type="text" value="70000"/> [Kč/rok]	Kapacita		
Náklady na prostor	<input type="text" value="24000"/> [Kč/rok]	Teoreticky dostupná kapacita	1970.0	[hod/rok]
Řezná kapalina		Dostupná kapacita	1773.0	[hod/rok]
Cena řezné kapaliny	<input type="text" value="180"/> [Kč/l]			
Životnost kapaliny	<input type="text" value="3600"/> [hod]			
Koncentrace kapaliny	<input type="text" value="6"/> [%]			
Spotřeba kapaliny	<input type="text" value="450"/> [l/rok]			
Náklady na likvidaci kapaliny	<input type="text" value="8"/> [Kč/l]			
Náklady na čištění kapaliny	<input type="text" value="2000"/> [Kč/rok]			
Kapacita				
Počet směn	<input type="text" value="1"/> [-]			
Využití kapacit	<input type="text" value="0.9"/> [-]			
Čas údržby	<input type="text" value="30"/> [hod/rok]			
Čas neplánované údržby	<input type="text" value="10"/> [hod/rok]			
Čas organizačních přestávek	<input type="text" value="50"/> [hod/rok]			
Přesčasy	<input type="text" value="60"/> [hod/rok]			

Obrázek 9.3: Záložka 'stroj'

Údaj o maximálních otáčkách vřetene je nutné specifikovat jen pro stroje typu soustruh. U ostatních strojů je vhodné omezit maximální dosažitelnou řeznou rychlost v panelu *Nastavení optimalizace*.

Ke stroji jsou také přiřazeny údaje o řezné kapalině. V případě, že stroj řeznou kapalinu nepoužívá, je nutné nastavit alespoň nákladové položky (cenu řezné kapaliny, náklady na likvidaci a náklady na čištění) na hodnotu 0.

Jak již bylo uvedeno dříve, obsluha stroje je definována v samostatné záložce. Kapacita specifikovaná v záložce stroj je spjata jen s daným strojním zařízením.

9.2.2 Nástroj

První položkou v záložce nástroj je typ použitého nástroje. Model rozlišuje nástroje s VBD a nástroje monolitní. Výběr daného typu změní skladbu zadávaných parametrů tak, aby byly získány všechny vstupy potřebné pro výpočty z kapitoly 7.4. Položka počet břitů v řezu udává vztah mezi posuvem na zub f_z a posuvem na otáčku f_n . Nástroj obsahuje sekci pro zadání koeficientů Taylorova komplexního vztahu pro trvanlivost nástroje. Pro přehlednost a snížení chybovosti je k dispozici i náhled konkrétního použitého vztahu.

Typ: Nástroj s břitovými destičkami ▾

Vstupy

Vstupní parametry nástroje

Název

Cena nástroje [Kč]

Počet řezných břitů [-]

Počet destiček na nástroji [-]

Životnost těla nástroje v násobcích životností břitů destiček [-]

Břitové destičky

Cena destičky [Kč]

Počet řezných hran [-]

Taylorovy koeficienty břitové destičky

$$T = \left(\frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f_v^{y_v} \cdot v_c} \right)^m$$

x_v [-]

y_v [-]

m [-]

C_v [-]

Výstupy

Cena na životnost břitu 203.25 [Kč/životnost]

Obrázek 9.4: Záložka 'nástroj'

Koeficienty je možné odhadnout na základě [14] nebo [15]. Vhodnější je koeficienty určit experimentálně přímo pro dané stanoviště. Design takového experimentu a následné odvození koeficientů je podrobně popsáno v [32].

9.2.3 Pracovník

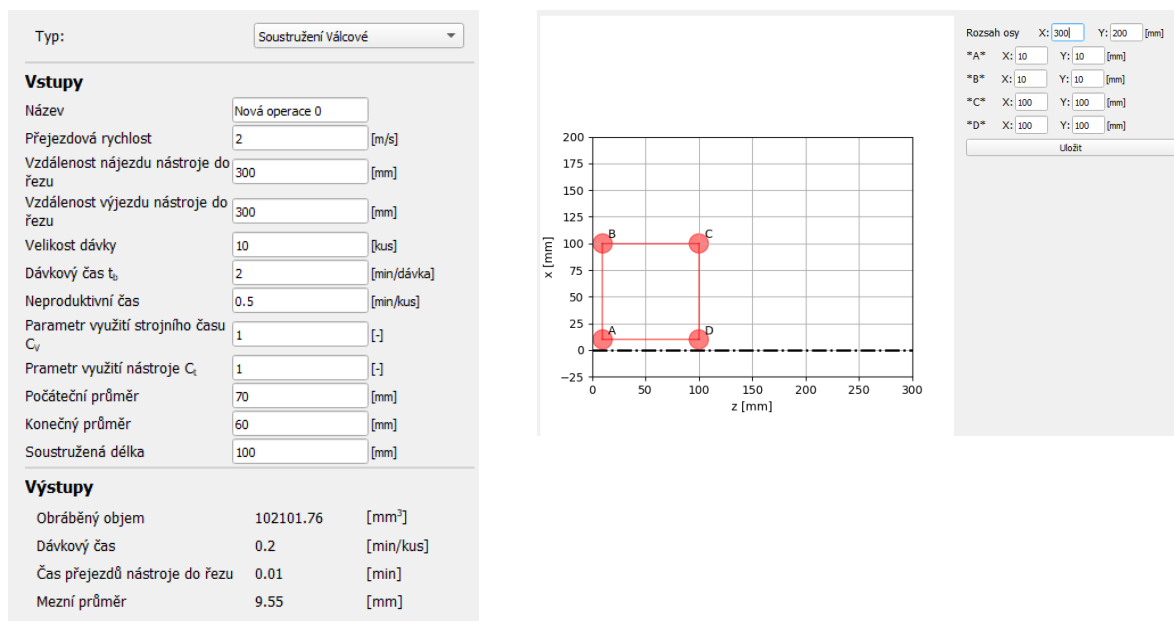
Třetí záložka panelu vstupních dat slouží pro definování nákladů obsluhy strojního zařízení. Uživatel může vyplnit všechny údaje potřebné pro výpočty z kapitoly 7.6 a stanovit kapacitu pracovníka stejným způsobem jako pro strojní zařízení.

Vstupy		
Informace o pracovníkovi		
Hrubá mzda	<input type="text" value="35000"/>	[Kč/měsíc]
Přirážka za práci přesčas	<input type="text" value="25"/>	[%]
Průměrné odměny	<input type="text" value="35000"/>	[Kč/rok]
Další roční náklady	<input type="text" value="16000"/>	[Kč/rok]
Kapacity		
Využití kapacit	<input type="text" value="0.9"/>	[-]
Čas organizačních přestávek	<input type="text" value="50"/>	[hod/rok]
Pracovní neschopnost	<input type="text" value="60"/>	[hod/rok]
Dovolená	<input type="text" value="200"/>	[hod/rok]
Přesčasy	<input type="text" value="60"/>	[hod/rok]
Výstupy		
Informace o pracovníkovi		
Super Hrubá mzda	47250.0	[Kč/měsíc]
Roční náklady	645631.58	[Kč/rok]
Měsíční náklady	53802.63	[Kč/měsíc]
HNS	419.51	[Kč/hod]
Kapacity		
Teoreticky dostupná kapacita	1710.0	[hod/rok]
Dostupná kapacita	1539.0	[hod/rok]

Obrázek 9.5: Záložka 'pracovník'

9.2.4 Proces

Záložka proces obsahuje na prvním místě opět výběr použitého procesu a technologie. V této verzi program rozlišuje *obecný proces*, popsáný v kapitole 7.2, *soustružení válcové a soustružení*. Válcové soustružení je definováno počátečním a koncovým průměrem a soustruženou délkou. Pro typ procesu *soustružení* byl navržen jednoduchý editor, který umožňuje definovat obráběný tvar pomocí čtveřice bodů, stejně jako bylo popsáno v kapitole 7.3.



Obrázek 9.6: Záložka 'proces' a editor soustružené plochy

Body lze v editoru upravovat tažením myši nebo zadáním přesných souřadnic bodu. Souřadnice bodů je nutné zapsat do systému kliknutím na tlačítko uložit.

9.2.5 Podnik

Záložka *Podnik* je velice jednoduchá. Lze v ní stanovit pouze cenu elektrické energie a hodinovou režijní sazbu podniku, která slouží jako souhrn nepřřazených fixních nákladů.

Cena elektrické energie	<input type="text" value="3"/>	[Kč/kWh]
Hodinová režijní sazba podniku	<input type="text" value="40"/>	[Kč/hod]

Obrázek 9.7: Záložka 'podnik'

9.3 Nastavení optimalizace

V první části panelu lze vybrat objekty stroj, proces, pracovníka a nástroj, které budou předmětem optimalizace. Program neumožňuje provádět optimalizaci přes více různých konfigurací najednou, i tak lze ale získat srovnání výsledků různých optimalizací díky sekci *Konfigurace pro srovnání* na panelu výsledků.

Nastavení optimalizace

Vybrané prvky

Zvolený Stroj: Nový stroj 0

Zvolený Nástroj: Nový nástroj 0

Zvolený Pracovník: Pracovník 0

Zvolený Proces: Nová operace 0

Řezná rychlost	Odhad	150	[m/min]	Fix. Hod.	min	0.01	max	1000
Posuv na otáčku	Odhad	0.2	[mm/ot]	Fix. Hod.	min	0.01	max	0.35
Hloubka řezu	Odhad	1	[mm]	Fix. Hod.	min	0.01	max	1.5

Optimalizační metoda: SLSQP

Optimalizovat **Reset**

Obrázek 9.8: Sekce 'Nastavení optimalizace'

Prostřední část panelu skýtá nastavení optimalizovaných veličin. Zadávané hodnoty do pole *odhad* mohou představovat výchozí stav procesu, v takovém případě poskytne panel *Srovnání* přehled o přínosech optimalizace. Pokud nejsou výchozí hodnoty k dispozici, je vhodné pole vyplnit odhadem optimálních hodnot. Tím je možné zlepšit rychlost konvergence následné optimalizace. V případě použití konvenčního soustruhu je možné přepnout veličinu *řezná rychlost* na *otáčky*. Model bude poté automaticky pracovat v režimu konstantních otáček. Každou optimalizovanou veličinu lze zafixovat, to znamená považovat ji za konstantu a vyřadit z optimalizačního modelu. V neposlední řadě je důležité nastavit omezující podmínky optimalizovaným veličinám ve formě jejich povoleného minima a maxima. Výsledky optimalizace, zvláště pro hodnotu hloubky řezu, leží často na hranici povoleného intervalu.

V poslední sekci panelu lze vybrat optimalizační metodu. Program podporuje celou řadu metod. Ukázalo se, že pro takto jednoduchý optimalizační problém jsou rozdíly mezi metodami minimální. I tak je doporučeno optimalizační metodu neměnit a ponechat optimalizaci algoritmu SLSQP, který vykazuje velice rychlé konvergentní chování a stabilitu. Je nutné mít na paměti, že ne všechny optimalizační metody dokáží pracovat s mezními podmínkami.

Po stisku tlačítka *optimalizovat* proběhne samotná optimalizace a její výsledky se zobrazí v panelu *Výsledky*. Po stisku tlačítka *reset* se panel výsledků opět přepočítá za použití vstupů daných zadaným odhadem. Díky tomu lze využít grafické výstupy panelu výsledků i pro výchozí stav před optimalizací.

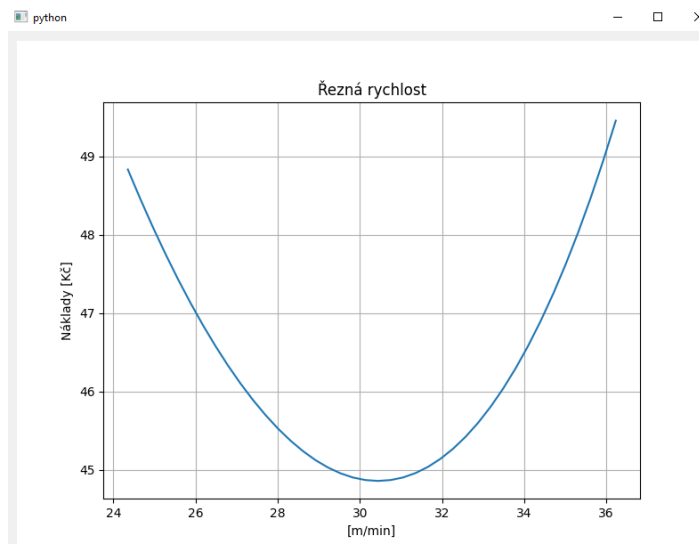
9.4 Výsledky

Panel výsledků zobrazuje především hodnotu celkových nákladů po optimalizaci a optimální řezné podmínky pro dosažení těchto nákladů.

Výsledky		
Celkové Náklady	44.86 Kč/kus	
Řezná rychlost	30.44	[m/min]
Posuv	0.25	[mm/ot]
Hloubka řezu	2.0	[mm]
Řezná rychlost	Graf	
Posuv	Graf	
Hloubka řezu	Graf	
Citlivostní analýza	Tornado diagram	
Konfigurace pro porovnání	Přidat konfiguraci	
	Skladba nákladů	

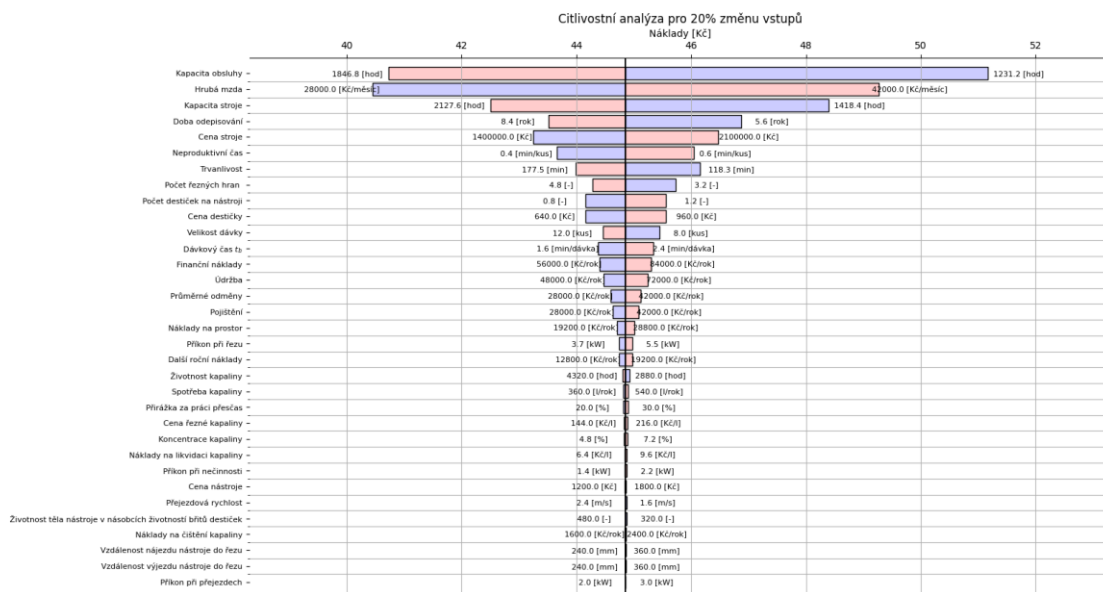
Obrázek 9.9: Sekce 'Výsledky'

Dále panel obsahuje několik grafických výstupů. Grafy se vždy zobrazí v novém okně. Pro překreslení grafu je nutné okno zavřít a znovu otevřít. Trojice grafů pro řezné podmínky ukazuje citlivost celkových nákladů na danou veličinu. Příklad takového grafu pro řeznou rychlost je vidět na obrázku 9.10.



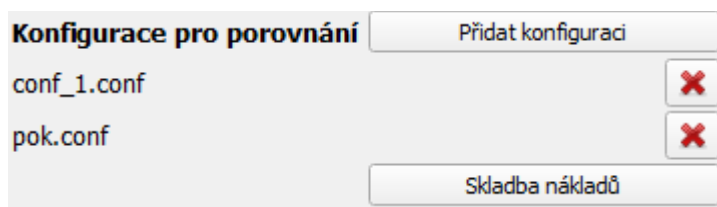
Obrázek 9.10: Ukázka grafu závislosti nákladů na řezné rychlosti

Níže je k dispozici citlivostní analýza vstupních dat reprezentována tornado diagramem. Tornado diagram je sestaven, řazen a filtrován automaticky na základě zadaných dat v panelu vstupní data.



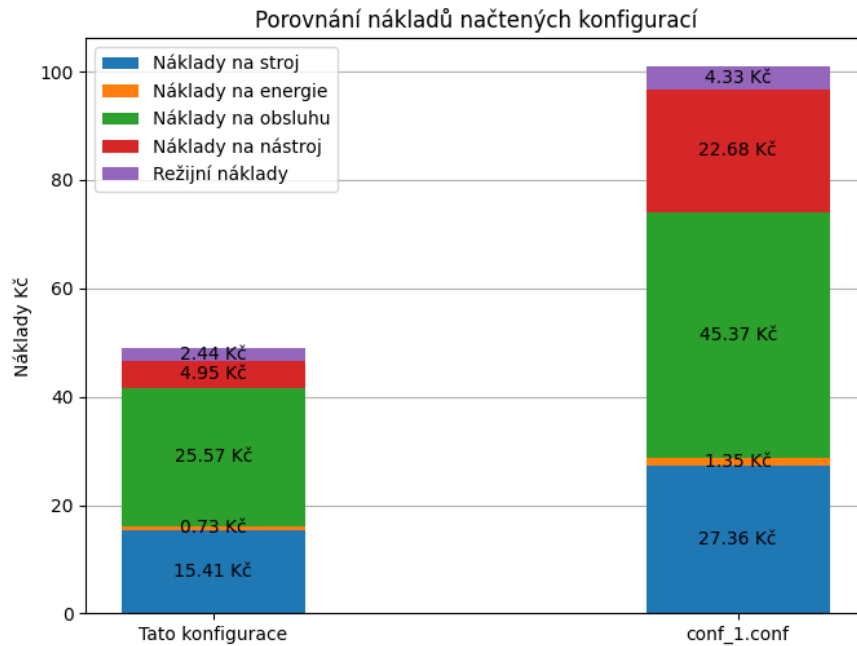
Obrázek 9.11: Ukázka tornádo diagramu

Posledním dostupným grafem je skladba nákladů s možností porovnání různých konfigurací. Konfigurace pro porovnání je nejprve nutné uložit do `.conf` souboru, poté je možné konfigurace vybrat stiskem tlačítka *přidat konfiguraci*. Maximální počet konfigurací pro srovnání není omezen. Konfigurace lze ze srovnání odebrat po kliknutí na tlačítko s křížkem, jak je vidět na obrázku 9.12.



Obrázek 9.12: Výběr konfigurací pro porovnání

U načtených konfigurací zobrazuje graf skladbu nákladů před optimalizací, pro zobrazení nákladů po optimalizaci je nutné přepsat řezné podmínky z panelu výsledků do panelu nastavení optimalizace. U aktivně zobrazené konfigurace (tato konfigurace), zobrazuje graf již optimalizovaná data. Ukázka grafu skladby nákladů je vidět na obrázku níže.



Obrázek 9.13: Ukázka grafu skladby nákladů

9.5 Srovnání

Panel srovnání poskytuje tabulkový náhled na některé veličiny před a po optimalizaci. Složení zobrazovaných veličin lze upravit editací seznamu *self.outputs* v programové třídě Configuration.

Srovnání				
	Před optimalizací	Po optimalizaci	Rozdíl	Jednotky
Časy				
Čas na operaci	4.32	4.32	0.0	[min/kus]
Čas přejezdů	0.01	0.01	0.0	[min/kus]
Strojní čas	3.41	3.41	0.0	[min/kus]
Čas nečinnosti	0.91	0.91	0.0	[min/kus]
Dávkový čas	0.2	0.2	0.0	[min/kus]
Čas výměny nástroje	0.21	0.21	0.0	[min/kus]
Neproduktivní čas	0.5	0.5	0.0	[min/kus]
Ostatní				
Životnost nástroje	130.0	130.0	0.0	[min]
Náklady				
Celkové náklady	62.58	62.58	0.0	[Kč/kus]
Stroj	24.44	24.44	0.0	[Kč/kus]
Energie	0.47	0.47	0.0	[Kč/kus]
Řezná kapalina	0.34	0.34	0.0	[Kč/kus]
Ostatní	23.62	23.62	0.0	[Kč/kus]
Operátor	29.94	29.94	0.0	[Kč/kus]
Nástroj	5.32	5.32	0.0	[Kč/kus]
Režije	2.88	2.88	0.0	[Kč/kus]

Obrázek 9.14: Ukázka tabulkového srovnání výsledků před a po optimalizaci

10 Demonstrace na modelovém příkladě

Hotový optimalizační nástroj byl použit na optimalizaci smyšleného obráběcího procesu. Nejtěžší částí sběru a odhadu teoretických dat pro nákladový model je smysluplné určení hodnot Taylorových koeficientů.

10.1 Určení výchozí hodnoty koeficientů Taylorova vztahu

Příkryl [14] uvádí Taylorův vztah s ukázkovými hodnotami jeho koeficientů ve tvaru

$$v(T) = \frac{C}{T^{\frac{1}{m}}} . \quad (10-1)$$

Dále definuje závislost trvanlivosti na tloušťce a šířce třísky pomocí řezné rychlosti v_T , což je řezná rychlost odpovídající určité trvanlivosti T . Pro rychlost v_T je nalezen vztah

$$v_T = \frac{C_T}{h^{x_v} \cdot s^{y_v}} . \quad (10-2)$$

Nyní je hledán vztah $v=f(T,h,s)$, který odpovídá oběma zmíněným rovnicím. V případě konstantních rozměrů třísky musí vztah přejít do tvaru podle rovnice 10-1, pro konstantní trvanlivost poté do formy dané vztahem 10-2. Vhodným kandidátem na výslednou funkci je

$$v = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}} \cdot h^{x_v} \cdot s^{y_v}} . \quad (10-3)$$

Pro konstantní trvanlivost poté musí platit

$$v_T = \frac{C_v}{T_{konst}^{\frac{1}{m}} \cdot h^{x_v} \cdot s^{y_v}} = \frac{C_T}{h^{x_v} \cdot s^{y_v}} , \quad (10-4)$$
$$C_T = \frac{C_v}{T_{konst}^{\frac{1}{m}}} .$$

Pro konstantní rozměry třísky lze dostat vztah

$$v = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}} \cdot h_{konst}^{x_v} \cdot s_{konst}^{y_v}} = \frac{C}{T^{\frac{1}{m}}} , \quad (10-5)$$
$$C = \frac{C_v}{h_{konst}^{x_v} \cdot s_{konst}^{y_v}} .$$

Díky vztahům pro konstanty C , C_v a C_T lze přepočítat hodnoty koeficientu C podle Příkryla pro použitý tvar Taylorova vztahu. Pro slinutý karbid obrábějící uhlíkovou ocel, hloubku řezu 1 mm a posuv na otáčku 0,25 mm Příkryl uvádí a hodnoty

$$\begin{aligned} C &= 475, \\ m &= 4,5; \\ x_v &= 0,04, \\ y_v &= 0,3 . \end{aligned} \tag{10-6}$$

Přepočítat je nutné pouze hodnotu parametru C na C_v . Pro zvolené hodnoty lze dospět k

$$C_v = C \cdot h_{konst}^{x_v} \cdot s_{konst}^{y_v} = 475 \cdot 1^{0,04} \cdot 0,25^{0,3} \cong 273 . \tag{10-7}$$

10.2 Vstupní data

Vstupní data modelového příkladu jsou shrnuta v tabulce 10.1.

Stroj	Hodnota	Jednotky	Nástroj	Hodnota	Jednotky	Proces	Hodnota	Jednotky
Cena	2750000	Kč	Typ	Nástroj s VBD	-	Typ	Soustružení válce	
Doba odepisování	7	rok	Cena	1500	Kč	Přejezdová rychlost	2	m/s
Spotřeba energie			Počet břitů v řezu	1	-	Délka nájezdu nástroje	300	mm
při nečinnosti	1.2	kW	Zbytková cena	200	Kč	Délka výjezdu nástroje	300	mm
při řezu	4.6	kW	Počet destiček na nástroji	1	-	Velikost dávky	10	kus
při přejezdech	2.3	kW	životnost v cyklech VBD	400	-	Dávkový čas	2	min/dávka
Maximální otáčky	5000	ot/min	Cena destičky	800	Kč	Neproduktivní čas	0.5	min/kus
Údržba	60000	Kč/rok	Počet břitů na destičce	4	-	CV	1	-
Pojištění	35000	Kč/rok	Taylorovy koeficienty			Počáteční průměr	70	mm
Finanční náklady	70000	Kč/rok	xv	0.04	-	Konečný průměr	60	mm
Náklady na prostor	24000	Kč/rok	yv	0.3	-	Soustružená délka	100	mm
Řezná kapalina			m	4.5	-	Podnik		
Cena	180	Kč/l	Cv	273	-	Cena elektrické energie	1.7	Kč/kWh
Životnost	3600	hod	Pracovník			Hodinová režijní sazba podniku	40	Kč/hod
koncentrace	6	%	Hrubá mzda	35000	Kč/měsíc			
Spotřeba	450	l/rok	Přirážka za práce přesčas	25	%	Výchozí řezné podmínky		
Náklady na likvidaci	8	Kč/l	Odměny	35000	Kč/rok	řezná rychlost	150	m/min
Náklady na čištění	0	Kč/rok	Další náklady	16000	Kč/rok	posuv	0.2	mm/ot
Kapacita			Kapacita			Hloubka řezu	1	mm
Počet Směn	1	-	Počet Směn	1	-			
Využití kapacit	0.9	-	Využití kapacit	0.9	-	minimální přípustná hloubka řezu	0.01	mm
Čas údržby	30	hod/rok	Dovolená	200	hod/rok	minimální přípustný posuv	0.01	mm/ot
Čas neplánované údržby	10	hod/rok	Pracovní neschopnost	60	hod/rok			
Čas organizačních přestávek	50	hod/rok	Čas organizačních přestávk	50	hod/rok	maximální přípustná hloubka řezu	1.5	mm
Přesčasy	60	hod/rok	Přesčasy	60	hod/rok	maximální přípustný posuv	0.35	mm/ot

Tabulka 10.1: Vstupní data modelového příkladu

Jedná se proces soustružení válce na CNC soustruhu nástrojem s VBD. Na vstupních datech byla provedena optimalizace algoritmem SLSQP. Nejprve byl proces optimalizován přes všechny parametry řezných podmínek. Data z optimalizace byla zaznamenána a proces byl optimalizován znovu tentokrát jen pro řeznou rychlost (hodnoty posuvu a hloubky řezu byly

nastaveny na výchozích hodnotách jako fixní). Výsledky optimalizace jsou k dispozici v tabulce 10.2.

<i>Veličina</i>	<i>Před optimalizací</i>	<i>Po optimalizaci</i>	<i>Po optimalizaci pouze v_c</i>
<i>Řezná rychlost</i>	150 m/min	138.5 m/min	166.5 m/min
<i>Posuv</i>	0.2 mm/ot	0.35 mm/ot	0.2 mm/ot
<i>Hloubka řezu</i>	1 mm	1.5 mm	1 mm
<i>Celkové náklady</i>	62.58 Kč/kus	33.28 Kč/kus	61.66 Kč/kus

Tabulka 10.2: Výsledky optimalizace modelového příkladu

Jak je vidět, v případě optimalizace všech řezných parametrů AMCO ušetřil náklady zkrácením výrobního času, čímž se zmenšil podíl nákladů připadajících na jeden kus. Řezná rychlost byla paradoxně snížena z navrhovaných 150 m/min na přibližně 139 m/min. Trvanlivost nástroje klesá s rostoucí řeznou rychlostí rychleji než s posuvem nebo hloubkou řezu. Zkrácení času operace je tedy docíleno nastavením průřezu třísky na maximální přípustnou hodnotu, což umožnilo dokonce zvýšit trvanlivost nástroje snížením právě řezné rychlosti. Podrobnější rozbor výsledků je k dispozici na obrázku 10.1.

Srovnání				
	Před optimalizací	Po optimalizaci	Rozdíl	Jednotky
Časy				
<i>Čas na operaci</i>	4.32	2.25	-2.07	[min/kus]
<i>Čas přejezdů</i>	0.01	0.0	0.0	[min/kus]
<i>Strojní čas</i>	3.41	1.41	-2.0	[min/kus]
<i>Čas nečinnosti</i>	0.91	0.84	-0.07	[min/kus]
<i>Dávkový čas</i>	0.2	0.2	0.0	[min/kus]
<i>Čas výměny nástroje</i>	0.21	0.14	-0.07	[min/kus]
<i>Neproduktivní čas</i>	0.5	0.5	0.0	[min/kus]
Ostatní				
<i>Životnost nástroje</i>	130.0	81.36	-48.64	[min]
Náklady				
<i>Celkové náklady</i>	62.58	33.28	-29.3	[Kč/kus]
<i>Stroj</i>	24.44	12.68	-11.75	[Kč/kus]
<i>Energie</i>	0.47	0.21	-0.26	[Kč/kus]
<i>Řezná kapalina</i>	0.34	0.18	-0.16	[Kč/kus]
<i>Ostatní</i>	23.62	12.29	-11.32	[Kč/kus]
<i>Operátor</i>	29.94	15.59	-14.36	[Kč/kus]
<i>Nástroj</i>	5.32	3.51	-1.81	[Kč/kus]
<i>Režije</i>	2.88	1.5	-1.38	[Kč/kus]

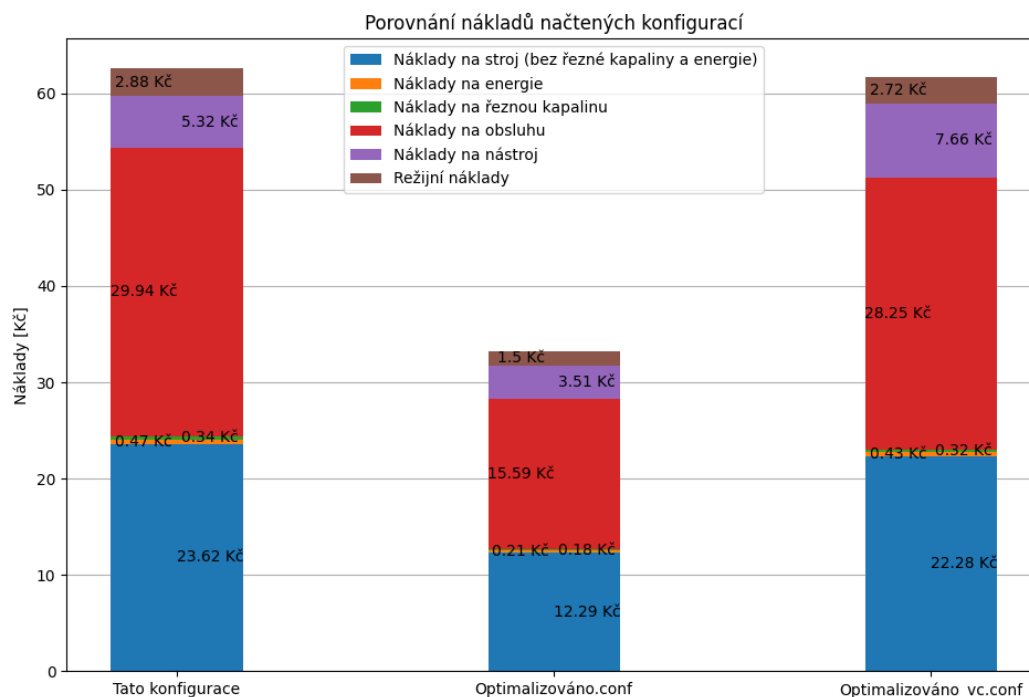
Obrázek 10.1: Výsledky optimalizace modelového příkladu

Při optimalizaci pouze řezné rychlosti nástroj dokázal ušetřit jen relativně malou část nákladů, což bylo způsobeno dobrým odhadem optimální řezné rychlosti pro dané podmínky. Program navrhl zvýšení řezné rychlosti o přibližně 9 %, což vede ke kratšímu času řezu i trvání celé operace. Program ovšem významně zkrátil životnost řezného nástroje, čímž zvýšil náklady spojené s jeho výměnou o necelých 40 %. Podrobnější rozbor výsledků je opět k dispozici na obrázku 10.2.

	Před optimalizací	Po optimalizaci	Rozdíl	Jednotky
Časy				
Čas na operaci	4.32	4.07	-0.24	[min/kus]
Čas přejezdů	0.01	0.0	0.0	[min/kus]
Strojní čas	3.41	3.07	-0.34	[min/kus]
Čas nečinnosti	0.91	1.0	0.09	[min/kus]
Dávkový čas	0.2	0.2	0.0	[min/kus]
Čas výměny nástroje	0.21	0.3	0.09	[min/kus]
Neproduktivní čas	0.5	0.5	0.0	[min/kus]
Ostatní				
Životnost nástroje	130.0	81.36	-48.63	[min]
Náklady				
Celkové náklady	62.58	61.66	-0.92	[Kč/kus]
Stroj	24.44	23.04	-1.4	[Kč/kus]
Energie	0.47	0.43	-0.04	[Kč/kus]
Řezná kapalina	0.34	0.32	-0.02	[Kč/kus]
Ostatní	23.62	22.28	-1.34	[Kč/kus]
Operátor	29.94	28.25	-1.7	[Kč/kus]
Nástroj	5.32	7.66	2.34	[Kč/kus]
Režije	2.88	2.72	-0.16	[Kč/kus]

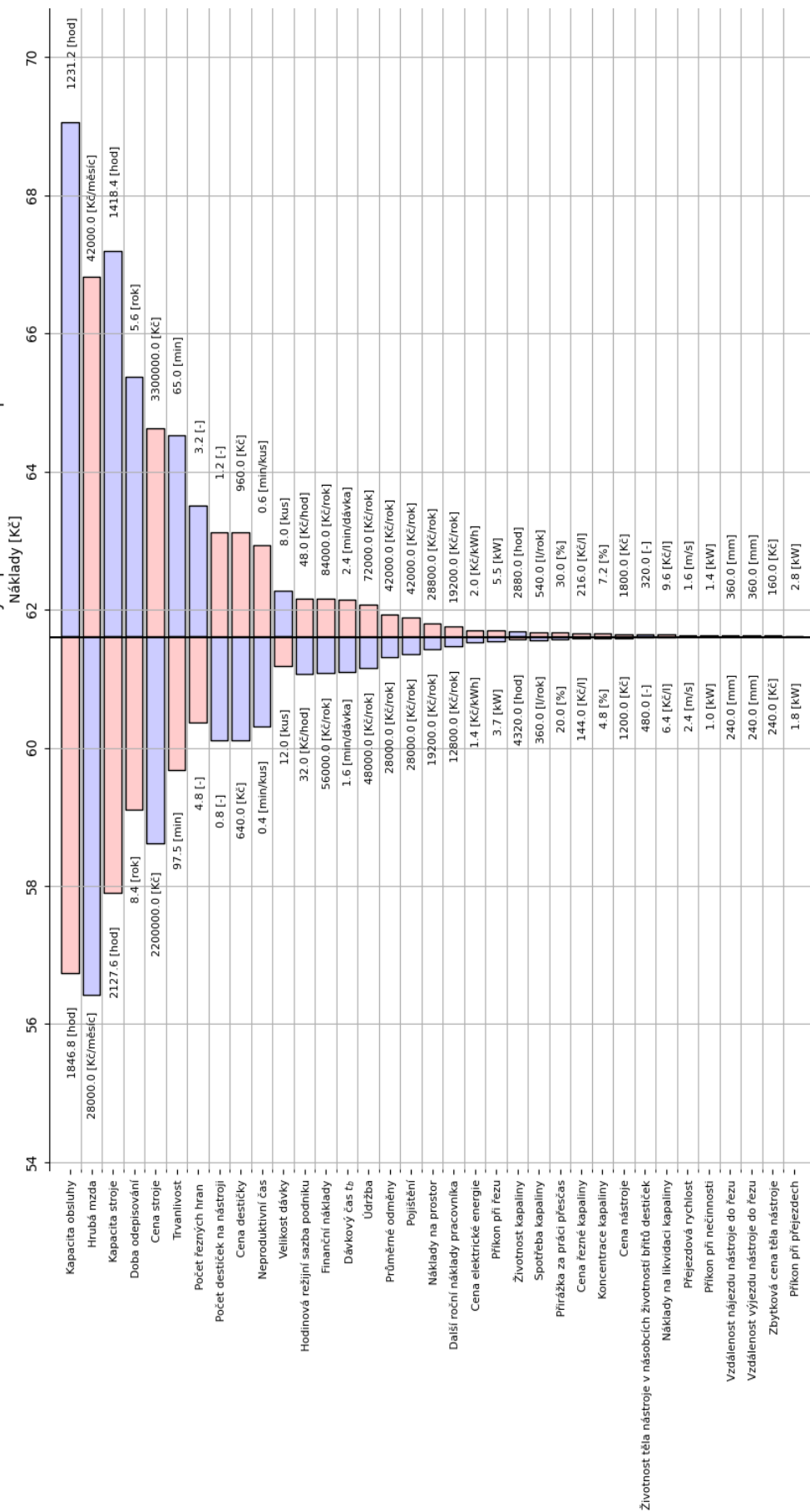
Obrázek 10.2: Výsledky optimalizace řezné rychlosti modelového příkladu

Po uložení optimalizovaných konfigurací a jejich srovnání s výchozím nastavením lze dospět ke grafu (obrázek 10.3) skladby nákladů. Je vidět, že náklady na stroj a obsluhu převažují nad ostatními nákladovými položkami. Složení nákladů po optimalizaci pouze řezné rychlosti vykazuje zmíněný nárůst nákladů na nástroj, ale pokles ostatních nákladových položek díky kratším výrobním časům. 10.4 zachycuje tornádo diagram po optimalizaci řezné rychlosti.



Obrázek 10.3: Skladba nákladů optimalizovaných konfigurací a výchozího nastavení

Citlivostní analýza pro 20% změnu vstupů



Obrázek 10.4: Tornádo diagram po optimalizaci řezné rychlosti

11 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a vytvořit nástroj pro kalkulaci a optimalizaci nákladů obráběcího procesu. Jako platforma pro vytvoření takového nástroje byl zvolen programovací jazyk python. Navržený program s označením AMCO je schopen pracovat s většinou technologií třískového obrábění. Zvláštní pozornost byla věnována technologii soustružení. Program je schopen sdružit technologie třískového obrábění nástrojem s definovanou geometrií do jednoho matematického modelu díky tomu, že nepracuje s trajektoriemi řezného nástroje, ale pouze s obráběným objemem.

V rámci teoretické části byly popsány některé z optimalizačních metod, které byly do programu implementovány. Metoda SLSQP se díky rychlosti a spolehlivosti ukázala pro daný případ jako nejlepší. Byla provedena rešerše již existujících nástrojů nákladové optimalizace obráběcích procesů. Tyto nástroje sloužily jako inspirace pro návrh programu AMCO.

V rámci praktické části byl kromě nákladového modelu odvozen i nový vztah pro výpočet trvanlivosti nástroje při soustružení libovolného tvaru při konstantních otáčkách vřetene. Odvození bylo koncipováno tak, aby získaný algoritmus mohl být velice jednoduše rozšířen a aplikován na libovolný soustružený tvar.

Program AMCO je vybaven přehledným grafickým rozhraním pro zadávání a získávání dat. Umožňuje ukládat a načítat různé konfigurace vstupních dat a navzájem je porovnávat. Programová dokumentace umožňuje snadnou orientaci ve zdrojovém kódu, což umožňuje program v budoucnu rozšířit o další funkce.

Program byl zkompileován do formátu `.exe`. V této podobě je program dostupný v elektronických přílohách práce.

11.1 Budoucí práce

Zvolený přístup při tvorbě aplikace AMCO se ukázal jako časově náročný. I když program splňuje požadavky zadání, jeho potenciál není ani zdaleka plně využit. Tato kapitola proto pojednává o dalších nápadech a ambicích, které do programu nebyly z důvodu rozsahu práce implementovány.

- Při procesu soustružení dokáže program pracovat s popisem operace ve formě čtyřúhelníku. Tento obrazec lze definovat pomocí grafického editoru. Následné matematické zpracování tohoto tvaru ovšem umožňuje použít libovolný n -úhelník. Grafický editor by bylo možné rozšířit o možnost přidávání a odebírání bodů nebo

možnost definování oblouků kružnic a dalších křivek, které lze posléze aproximovat n-úhelníky. O trochu pracnější by bylo implementovat kompatibilitu s některými formáty podporovanými CAD programy. Uživatel by poté jen nahrál například *.stl* soubor obsahující skicu soustruženého objemu.

- Stejnou pozornost, jaká byla věnována procesu soustružení, si zaslouží i další obráběcí operace. Odvození podrobnějších modelů pro trvanlivost nástrojů speciálně pro další technologie, jako například pro frézování nebo vrtání, a návrh rozumného popisu obráběného objemu i pro tyto technologie (například nahráním *.stl* souboru) by jistě zvýšilo potenciál programu AMCO.
- Z důvodu ušetření času programování ukládá AMCO konfigurace jako binární soubory – obrazy hlavní třídy programu Configuration. Tento přístup téměř vylučuje zpětnou kompatibilitu uložených dat s novými verzemi programu. Systematičtější by bylo ukládat konfiguraci ve formě textového souboru. Návrh vhodných metod pro konstrukci takového textu a následnou rekonstrukci třídy Configuration je proto dalším návrhem na budoucí zlepšení programu.
- Program nyní neumožňuje optimalizovat přes větší množství nástrojů nebo strojů najednou. Optimalizaci řezných podmínek je nutné spustit pro každý nástroj zvlášť a výsledky porovnat. Použitý nástroj nebo stroj by se mohl stát další vstupní diskrétní veličinou optimalizační metody.
- Program umožňuje optimalizovat pouze náklady připadající na jeden vyrobený kus. V praxi je toto zřídka kdy jediným kritériem optimálnosti. Do grafického rozhraní by bylo vhodné přidat sekci s nastavením cílové funkce optimalizačního algoritmu. Cílová funkce se může skládat z optimalizace nákladů na kus nebo na jednotku času, z předepsaného taktu výroby nebo může být zohledněn například termín nutného dokončení celé zakázky. Průběh této cílové funkce, jak již bylo řečeno v kapitole 5, nemusí být čistě konvexní a může obsahovat více lokálních minim. Z tohoto důvodu by bylo nutné použít některou z globálních optimalizačních metod. Na základě řešení provedené v kapitole 5.3 lze vybrat metodu optimalizace hejnem částic jako vhodného kandidáta na tuto úlohu.
- Hlavním úskalím správného použití programu je určení Taylorových koeficientů. V práci byly citovány zdroje, které uživatele provedou nutnými procedurami pro jejich zjištění. Program AMCO by mohl být vybaven modulem, který nejen že uživatele provede návrhem potřebných experimentů, ale na základě naměřených dat provede potřebné výpočty a odvození hodnot koeficientů sám.

Zdroje

- [1] Kardekar, Abhijit Dilip, *Modeling and optimization of machining performance measures in face milling of automotive aluminum alloy a380 under different lubrication/cooling conditions for sustainable manufacturing* (2005). University of Kentucky Master's Thesis. 373.
- [2] HOSFORD, William F. Slip-Line Field Theory. HOSFORD, William F. *Fundamentals of Engineering Plasticity* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, s. 47-67 [cit. 2021-7-18]. ISBN 9781139775373. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781139775373.007
- [3] WANG, Z. a M. RAHMAN. High-Speed Machining. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 221-253 [cit. 2021-7-18]. ISBN 9780080965338. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01113-4
- [4] ARMAREGO, E. J. A., D. OSTAFIE V, S. W. Y. WONG a S. VEREZUB. AN APPRAISAL OF EMPIRICAL MODELING AND PROPRIETARY SOFTWARE DATABASES FOR PERFORMANCE PREDICTION OF MACHINING OPERATIONS. *Machining Science and Technology* [online]. 2000, 4(3), 479-510 [cit. 2021-7-18]. ISSN 1091-0344. Dostupné z: doi:10.1080/10940340008945719
- [5] DE TONI, A. a S. TONCHIA. Lean organization, management by process and performance measurement. *International Journal of Operations & Production Management* [online]. 1996, 16(2), 221-236 [cit. 2021-7-18]. ISSN 0144-3577. Dostupné z: doi:10.1108/01443579610109947
- [6] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [7] HUMÁR, Anton. *Technologie 1: Technologie obrábění* [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2003 [cit. 2021-7-18]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [8] NĚMEC, Dobroslav. *Strojírenská technologie 3: Strojní obrábění*. 2. vydání. Praha: SNTL, 1982.
- [9] HAVRAN, Petr. *FRÉZOVACÍ NÁSTROJE ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] ZEMČÍK, Oskar. *Podklady do cvičení: Výběr z norem a návody pro konstrukci vnějšího soustružnického nože*. [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-7-18]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/fpn_pripavky_a_nastroje/FPN_podklady_s_nuz.pdf. Učební materiály. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [11] ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERM s r.o., 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
- [12] HUMÁR, A. Technologie 1- Technologie obrábění – 1.část, Studijní opory pro magisterskou formu studia [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003. 138 s. [vid. 2012-10-04].

Dostupné z: http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/Technologie%20TI_TO-1cast.pdf

- [13] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *ÚVOD DO TEORIE OBRÁBĚNÍ*. Ostrava: VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ, 2013. ISBN 978-80-248-3013-1.
- [14] ZDENĚK, Přikryl a Rosa MUSÍLKOVÁ. *Teorie Obrábění*. Praha: SNTL, 1971.
- [15] Metal Cutting Theory and Practice. *Metal cutting theory and practice*. Third edition. Boca Raton, [2016], s. 751-777. ISBN 978-1-4665-8753-3.
- [16] JAYANTI, S. Economics of Machining. *Engineering notes* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://www.engineeringenotes.com/industrial-engineering/machining/economics-of-machining-machine-tools-industrial-engineering/25406>
- [17] POPESKO, Boris. *Moderní metody řízení nákladů: jak dosáhnout efektivního vynakládání nákladů a jejich snížení*. Praha: Grada, 2009. Prosperita firmy. ISBN 978-80-247-2974-9.
- [18] *Custompart.net* [online]. Williamsburg, 2021 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/estimate/machining/>
- [19] *Costimator* [online]. MTI Systems, 2021 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://www.mtisystems.com/Machining.html>
- [20] JOHNSON, Methew Russell. *A NEW MACHINING COST CALCULATOR (MC2)*. Florida, 2011. Master's thesis. University of Florida.
- [21] ROSSI, Francesca. *Principles and Practice of Constraint Programming*. 26th International Conference, CP 2020, Louvain-la-Neuve, Belgium, September 7–11, 2020, Proceedings: Springer, 2020. ISBN 978-3-030-58475-7.
- [22] THE SCIPY COMMUNITY. *Scipy documentation* [online]. 2021 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/optimize.html>
- [23] BARRETT, Richard, Michael BERRY, Tony F. CHAN, et al. *Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods* [online]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994 [cit. 2021-7-19]. ISBN 978-0-89871-328-2. Dostupné z: doi:10.1137/1.9781611971538
- [24] HORST, Reiner. *Global optimization*. 2nd, revised ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993. ISBN 35-405-6094-7.
- [25] STEPANENKO, Svetlana. *Global Optimization Methods*. Würzburg, 2008. Disertační práce. Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- [26] SVOZIL, Jan. *OPTIMALIZACE POTRUBNÍCH TVAROVEK*. Brno, 2010. Disertační práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [27] SINGER, Saša a John NELDER. Nelder-Mead algorithm. *Scholarpedia* [online]. 2009, 4(7) [cit. 2021-7-19]. ISSN 1941-6016. Dostupné z: doi:10.4249/scholarpedia.2928
- [28] BAZARAA, Mokhar S., Hanif D. SHERALI a C.M SHETTY. *Nonlinear Programming. Theory and Algorithms*. 2 ed. New York: John Wiley, 1993. ISBN 978-0471557937.
- [29] Rosenbrock method. *Kranf site* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <http://www.applied-mathematics.net/optimization/rosenbrock.html>

- [30] KRAFT, Dieter. *A Software Package for Sequential Quadratic Programming*. Oberpfafenhoffen: Institut für Dynamik der Flugsysteme, 1988.
- [31] Hoblování a obrázení. *Docplayer* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9772883-Hoblovani-a-obrazeni.html>
- [32] G. Van Rossum a F. L. Drake Jr, *Python tutorial*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands, 1995.
- [33] PyQT, “PyQt Reference Guide”, 2012. WWW: <http://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt4/html/index.html>.
- [34] JONES, Eric, Travis OLIPHANT a Pearu PETERSON. *SciPy: Open Source Scientific Tools for Python*. 2001. Dostupné také z: <http://www.scipy.org>
- [35] DOS SANTOS, A.L.B., M.A.V. DUARTE, A.M. ABRÃO a A.R. MACHADO. An optimisation procedure to determine the coefficients of the extended Taylor's equation in machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1999, **39**(1), 17-31 [cit. 2021-7-20]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(98)00025-X

Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotka	Význam
A_d	mm ²	Jmenovitý průřez třísky
a_p	mm	hloubka řezu
b_D	mm	Jmenovitá šířka třísky
C	-	Koeficient taylorova vztahu
$C_1 - C_4$	Kč/kus	Nákladové položky zjednodušeného modelu
c_{con}	-	Koncentrace řezné kapaliny
CF	-	Cílová funkce
C_o	Kč/kus	Celkové náklady zjednodušeného modelu
C_t	-	parametr využití nástroje
C_v	-	Parametr úměrnosti strojního času a času řezu
C_v	-	Koeficient taylorova vztahu
C_{vT}	-	Koeficient taylorova vztahu
D, d	mm	Průměr
d_{mez}	mm	Mezní průměr
d_{min}	mm	Nejmenší soustružený průměr
dv	kus	Velikost dávky
E_E	kWh/kus	Celková spotřeba energie
f	mm	posuv
f_n	mm/ot	Posuv na otáčku
h_p	mm	Jmenovitá tloušťka třísky
HNS_{Fstr}	Kč/hod	Hodinová nákladová sazba fixních nákladů stroje
HNS_{kap}	Kč/hod	Hodinová nákladová sazba řezné kapaliny
HNS_n	Kč/hod	Hodinová nákladová sazba nástroje
HRS_p	Kč/hod	Hodinová režijní sazba podniku
KAP_{ef}	hod/rok	efektivně využitá kapacita
l_{in}	mm	Délka trajektorie nájezdu nástroje do řezu
l_{out}	mm	Délka trajektorie výjezdu nástroje do řezu
m	-	Koeficient taylorova vztahu
n	ot/min	Otáčky
N	Kč/kus	Celkové náklady na operaci
$N_{čis}$	Kč/rok	Roční náklady na čištění řezné kapaliny
N_{con}	Kč/rok	Roční náklady na pořízení řezné kapaliny
N_{enOp}	Kč/kus	Náklady na energii
N_{fin}	Kč/rok	Finanční náklady stroj
N_{lik}	Kč/rok	Roční náklady na likvidaci řezné kapaliny
N_{mzda}	Kč/rok	Mzdové náklady
N_{nasOp}	Kč/kus	Náklady nástroje na operaci
N_o	Kč	Náklady jednoho přeastření
N_{obsOp}	Kč/kus	Náklady obsluhy na operaci
N_{plocha}	Kč/rok	Náklady na plochu
N_{podOp}	Kč/kus	Režijní náklady na operaci

N_{poj}	Kč/rok	Náklady na pojištění
$N_{přesčas}$	Kč/rok	Náklady za práci přesčas
$N_{řk}$	Kč/rok	Roční náklady na řeznou kapalinu
N_{strOp}	Kč/kus	Náklady stroje na operaci
N_t	Kč	Náklady na nástroj na jeho trvanlivost
$N_{údržba}$	Kč/rok	Náklady na údržbu
N_z	Kč	Náklady nástroje za životnost
ODP	Kč/rok	Roční odpisy
P	-	Pořadové číslo bodu
p_{con}	Kč/l	Cena koncentrátu řezné kapaliny
$P_{cutting}$	kW	Příkon stroje v řezu
p_E	Kč/kWh	Cena elektrické energie
p_n	Kč	Cena nástroje
p_{nz}	Kč	Zbytková cena nástroje
$p_{přesčas}$	%	Přirážka za práci přesčas
p_s	Kč/(m ² .rok)	Roční nákladová sazba jednotky plochy
$P_{shifting}$	kW	Příkon stroje při přejezdech
$P_{standby}$	kW	Příkon stroje při nečinnosti
p_{str}	Kč	Požizovací cena stroje
p_{VBD}	Kč	Cena břitové destičky
Q	l/rok	Roční spotřeba řezné kapaliny
R, r	mm	Poloměr
S	mm ²	Obsah
S_{ob}	mm ²	Obsah soustruženého obrazce
S_v	m ²	Výrobní plocha
T	min	Trvanlivost nástroje
t_{An}	min/kus	Čas nečinnosti
t_{AS}	min/kus	strojní čas
t_{AScut}	min	Čas řezu
$t_{AScut,n}$	min/kus	Čas řezu v podmínkách s konstantními otáčkami
$t_{AScut,v}$	min/kus	Čas řezu v podmínkách s konstantní řeznou rychlostí
t_{ASN}	min	Čas příjezdu nástroje
t_{ASP}	min	Čas odjezdu nástroje
t_B	min	Dávkový čas
t_{Bn}	min/kus	Dávkový čas na operaci
t_{ct}	min/kus	Čas výměny nástroje připadající na jeden kus
T_{ct}	min	Čas výměny nástroje
t_{dz}		Čas dvojezdvihu
t_{dzcut}	min	Čas řezu jednoho dvojezdvihu
t_i	min/kus	Neproduktivní čas
t_o	min/kus	Čas operace
T_p	-	Poměrná spotřeba trvanlivosti
$t_{přesčas}$	hod/rok	Roční objem přesčasů

T_{str}	rok	Doba odepisování stroje
$t_{transfer}$	min/kus	Čas přejezdů nástroje
v_c	m/min	Řezná rychlost
v_{cT}	m/min	Řezná rychlost pro konstantní trvanlivost nástroje
v_e	m/min	Teoreticky přesná řezná rychlost
v_f	m/min	Rychlost posuvu
V_{ob}	mm ³	Obrobený objem
V_{obz}	mm ³	Objem odebraný jedním zubem
v_T	m/s	Rychlost přejezdu nástroje
x_{AS}	Kč/min	Nákladová sazba
x_{ct}	Kč/min	Nákladová sazba
x_i	Kč/min	Nákladová sazba
x_v	-	Koeficient Taylorova vztahu
y_T	mm	y souřadnice těžiště
y_v	-	Koeficient Taylorova vztahu
z	-	Počet destiček na nástroji
z_b	-	Počet břitů na VBD
z_o	-	Počet možných přeastření
z_u	-	Životnost těla nástroje v cyklech VBD
$\mu_1-\mu_2$	-	Koeficienty úměrnosti zjednodušeného modelu