

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 - **Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality**

Studijní specializace: **Bez specializace**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace NC kódu při obrábění tvarových ploch.

Autor: Bc. Martin KRULIŠ

Vedoucí práce: Ing. Jan HNÁTÍK, Ph.D.

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KRULIŠ**
Osobní číslo: **S22N0062P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Optimalizace NC kódu při obrábění tvarových ploch**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

- Úvod
- Definice cílů
- Rozbor současného stavu
- Návrh experimentu
- Provedení experimentu
- Vyhodnocení experimentu
- Technické hodnocení
- Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- STANĚK, J., NĚMEJC, J. Metodika zpracování a úprava diplomových prací. Plzeň: ZČU, 2005, ISBN 80-7043-363-9.
- MAREK, J. a kol.: Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha, MM publishing, 2014, ISBN: 978-80-260-6780-1.
- Softwarová optimalizace obrábění složitých tvarových ploch při práci na čisto s ohledem na ochranu nástroje [písemná práce ke státní doktorské zkoušce], Libor Hamouz, 2010.
- ŠTULPA, M.: CNC programování obráběcích strojů. Praha, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design / Yusuf Altintas, Cambridge, 2012, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-17247-9.
- NEZBEDA, Lukáš. *Softwarová optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos*, 2021.
- *SINUMERIK 840D sl / 828D Pro pokročilý: Programovací příručka*. Siemens AG Industry Sector Postfach 48 48 90026 NÜRNBERG NĚMECKO, 2010.
- *SINUMERIK 840D sl / 828D Základy: Programovací příručka*. Siemens AG Industry Sector Postfach 48 48 90026 NÜRNBERG NĚMECKO, 2010.
- KRULIŠ, Martin. *Nástroje systému Sinumerik pro řízení posuvové rychlosti a jejich praktické využití*, 2022.
- *EUREKA CHRONOS – USER MANUAL*, 2021.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Luboš Kroft, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem zúčastněným, kteří pomohli v tvorbě této práce ať již přímo prostřednictvím konzultací k relevantním tématu, tak nepřímo. Zejména děkuji vedoucímu této diplomové práce Ing. Janu Hnátíkovi, Ph.D. za jeho vstřícný a profesionální přístup. Dále bych chtěl také poděkovat panu konzultantovi Ing. Lubošovi Kroftovi, Ph.D. za poskytnuté cenné rady a informace. Závěrem děkuji své rodině za veškerou podporu během studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kruliš	Jméno Martin		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 – Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Hnátík, Ph.D.	Jméno Jan		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace NC kódu při obrábění tvarových ploch.			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2024
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	66	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Cílem práce je praktické ověření chování optimalizovaného NC programu, který bude optimalizovaný pomocí softwaru Eureka for Chronos při reálném obrábění tvarově složitého dílce. Dalším cílem diplomové práce bude zkoumat vliv nastavení nástrojů Sinumeriku pro posuvovou rychlost FNORM, FLIN a FCUB a cyklu 832 na reálné součásti při reálných podmínkách. Porovnáním výsledků experimentů bude zjištěno, zda poznatky z předchozích kvalifikačních prací jsou přínosem i v reálném stavu.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>posuvová rychlost, cyklus 832, optimalizace, NC kód, Sinumerik 840D sl, charakteristiky posuvové rychlosti</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kruliš	Name Martin		
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 – Machining, Additive Technology and Quality Assurance			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Hnátík, Ph.D.	Name Jan		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Optimizing NC code when machining shaped surfaces.			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	66	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The goal of the work is the practical verification of the behavior of the optimized NC program, which will be optimized using the Eureka for Chronos software during the real machining of a part with a complex shape. Another goal of the thesis will be to investigate the influence of Sinumerik tool settings for FNORM, FLIN and FCUB feed rate and cycle 832 on real components under real conditions. By comparing the results of the experiments, it will be determined whether the findings from the previous qualification works provide useful knowledge even in the real situation.
KEY WORDS	feed rate, cycle 832, optimalization, NC code, Sinumerik 840D sl, feed rate characteristics

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	11
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	15
2 Definice cílů	16
3 Rozbor současného stavu	17
3.1 Stroj MCU 450V-5X.....	17
3.1.1 Základní koncepce stroje.....	17
3.1.2 Lineární a rotační osy	18
3.1.3 Pracovní prostor	18
3.1.4 Parametry získané ze stroje	18
3.1.5 Technické parametry	18
3.2 Sinumerik 840D sl.....	19
3.2.1 Cyklus 832.....	19
3.2.1.1 Funkce G64, G641 a G642.....	20
3.2.1.2 Funkce G643, G644 a G645.....	21
3.2.1.3 Kompresor NC bloků	21
3.3 Eureka for Chronos	22
3.3.1 Popis principu fungování	23
3.3.1.1 Nastavení stroje	24
3.3.1.2 Program okno	25
3.3.2 Metody optimalizace	26
3.3.2.1 Objemový faktor	26
3.3.2.2 Tloušťka třísky	27
3.3.2.3 Výkon a točivý moment	27
3.3.2.4 Kombinace	27
3.3.2.5 A.I.....	27
3.4 Analýza předchozích prací	28
3.4.1 Nástroje systému Sinumerik pro zvýšení posuvové rychlosti a jejich praktické využití 28	
3.4.1.1 FNORM.....	28
3.4.1.2 FLIN	29
3.4.1.3 FCUB	29
3.4.1.4 Popis experimentu	30

3.4.1.5	Ukázka vyhodnocení experimentu	30
3.4.1.6	Získané poznatky z analýzy předchozích prací	33
3.4.2	Optimalizace NC kódu pomocí Eureka for Chronos	33
3.4.2.1	Poznatky získané z tvorby optimalizovaných NC programů	33
4	Návrh experimentu	35
4.1	Vytvoření NC programu	35
4.1.1	Hrubování	35
4.1.2	Zbytkové hrubování	36
4.1.3	Dokončení	37
4.2	Výpočty pro optimalizaci	38
4.2.1	Ověření algoritmu pro střední tloušťku třísky	38
4.2.2	Hrubování	40
4.2.2.1	Objemový faktor – Q_1	40
4.2.2.2	Tloušťka třísky – h_{m1}	41
4.2.3	Zbytkové hrubování	41
4.2.3.1	Objemový faktor – Q_2	41
4.2.3.2	Tloušťka třísky – h_{m2}	42
4.2.4	Dokončení	43
4.2.4.1	Objemový faktor – Q_3	43
4.2.4.2	Tloušťka třísky – h_{m3}	44
4.3	Nastavení Eureka for Chronos	45
4.3.1	Metoda objemového faktoru	45
4.3.2	Metoda tloušťky třísky	46
5	Provedení experimentu	48
5.1	Hrubování bez cyklu 832	49
5.2	Hrubování s cyklem 832 a bez funkce Sinumeriku pro posuvovou rychlost	49
5.3	Hrubování s FNORM	49
5.4	Hrubování s FLIN	50
5.5	Hrubování s FCUB	50
6	Vyhodnocení experimentu	51
6.1	Postup výpočtů u vyhodnocení experimentu	51
6.2	Hrubování bez cyklu 832	52
6.3	Hrubování s cyklem 832 a bez funkce Sinumeriku pro posuvovou rychlost	53
6.4	Hrubování s FNORM	54
6.5	Hrubování s FLIN	54

6.6	Hrubování s FCUB	55
6.7	Porovnání hodnot	55
6.8	Kontrola dráhy.....	59
6.8.1	Porovnání COMPCAD a COMPOF	59
6.9	Porovnání celkové ujeté vzdálenosti	62
7	Technické zhodnocení.....	63
8	Závěr.....	64
	Seznam použitých zdrojů	66

Přehled použitých zkratk a symbolů

A	Průřez odřezávané vrstvy [mm^2]
a_e	Radiální hloubka řezu [mm]
A.I.	Artificial Intelligence – Umělá inteligence
a_p	Axiální hloubka řezu [mm]
ČSN	Česká státní norma
D	Průměr nástroje [mm]
f_z	Posuv na zub [mm/zub]
h_m	Střední tloušťka odřezávané vrstvy [mm]
L_{xyz}	Celková ujetá vzdálenost v závislosti na všech osách [mm]
$L_{xyz,n}$	Celková ujetá vzdálenost v osách X, Y a Z za určitý časový interval [mm]
n	Otáčky [ot/min]
NC	Numerical Control – Číslicově řízený
PLC	Programmable logic controller – Programovatelný logický automat
Q	Objemový faktor [cm^3/min]
RTI	Regionální technologický institut
T	Doba trvání programu [s]
v_c	Řezná rychlost [m/min]
v_f	Posuvová rychlost [mm/min]
X_n	Ujetá vzdálenost v ose X za určitý časový interval [mm]
x_2	Souřadnice v ose X druhého bodu [mm]
x_1	Souřadnice v ose X prvního bodu [mm]
Y_n	Ujetá vzdálenost v ose Y za určitý časový interval [mm]
Z_n	Ujetá vzdálenost v ose Z za určitý časový interval [mm]
z	Počet zubů
κ_r	Úhel nastavení hlavního ostří [$^\circ$]

Seznam obrázků

Obr. 1: Základní koncept stroje [1]	17
Obr. 2: Lineární a rotační osy [1]	18
Obr. 3: Technické parametry [1]	19
Obr. 4: Možnosti nastavení tolerance cyklu 832 [4]	20
Obr. 5: Grafická ukázka funkcí G64, G641 a G642 [4]	20
Obr. 6 Grafická ukázka funkce G645 [6]	21
Obr. 7: Grafická ukázka funkce kompresoru [4]	22
Obr. 8: Ukázka základního prostředí Eureka for Chronos	23
Obr. 9: Ukázka prostředí po simulaci Eureka for Chronos	24
Obr. 10: Ukázka posuvové rychlosti před a po optimalizaci [10]	24
Obr. 11: Ukázka okna nastavení stroje	25
Obr. 12: Ukázka program okna	25
Obr. 13: Ukázka zadávání mechanických a tepelných vlastností materiálu	26
Obr. 14: Ukázka zadání hodnot pro metodu objemového faktoru	26
Obr. 15: Ukázka zadání hodnot pro metodu tloušťky třísky	27
Obr. 16: Ukázka zadání hodnot pro metodu výkonu	27
Obr. 17: Ukázka zadání hodnot pro metodu kombinace	27
Obr. 18: Ukázka zadání hodnot pro metodu A.I.	28
Obr. 19: Grafická ukázka posuvové rychlosti funkce FNORM [13]	28
Obr. 20: Grafická ukázka posuvové rychlosti funkce FLIN [13]	29
Obr. 21: Grafická ukázka posuvové rychlosti funkce FCUB [13]	29
Obr. 22: Graf závislosti polohy osy x na čase při vyhodnocení funkcí z druhého měření [3].	30
Obr. 23: Detailní pohled na graf závislosti polohy osy x na čase při vyhodnocení funkcí z druhého měření [3]	31
Obr. 24: Graf funkce posuvové rychlosti v_f při použití funkce FLIN v závislosti na čase [3]	31
Obr. 25: Graf funkce posuvové rychlosti v_f při použití funkce FLIN s CYCLE832 a tolerancí 0,1 mm [3]	32
Obr. 26: Odhrotovací matrice	35
Obr. 27: Použitý nástroj pro hrubování	35
Obr. 28: Ukázka drah obrábění u hrubování	36
Obr. 29: Použitý nástroj pro zbytkové hrubování	36
Obr. 30: Ukázka drah obrábění u zbytkového obrábění	37
Obr. 31: Použitý nástroj pro dokončení	37
Obr. 32: Ukázka drah pro dokončení	38
Obr. 33: Ukázka návrhu testu pro střední tloušťku třísky	39

Obr. 34: Graf testu posuvové rychlosti při optimalizaci střední tloušťky třísky.....	39
Obr. 35: Vlastnosti materiálu	45
Obr. 36 Metoda objemového faktoru komplet	45
Obr. 37: Detailní pohled metody objemového faktoru pro hrubování.....	46
Obr. 38: Metoda tloušťky třísky komplet.....	46
Obr. 39: Detailní pohled metody tloušťky třísky pro hrubování.....	47
Obr. 40: Ukázka nastavení SL Trace v řídicím systému Sinumerik	48
Obr. 41: Ukázka deseti hodnot získaných ze stroje pro hrubování bez cyklu 832	51
Obr. 42: Graf posuvové rychlosti bez cyklu 832	52
Obr. 43: Graf posuvové rychlosti s cyklem 832 a bez funkce F	53
Obr. 44: Graf posuvové rychlosti s FNORM	54
Obr. 45: Graf posuvové rychlosti s FLIN	54
Obr. 46: Graf posuvové rychlosti s FCUB	55
Obr. 47: Porovnání posuvových rychlostí všech měření.....	56
Obr. 48: Porovnání posuvových rychlostí s cyklem 832	56
Obr. 49: Detail porovnání posuvových rychlostí s cyklem 832.....	56
Obr. 50: Porovnání délky dráhy programu bez cyklu 832 a programem s cyklem 832 a bez F	57
Obr. 51: Detail 1 porovnání délky dráhy programu bez cyklu 832 a programem s cyklem 832 a bez F	58
Obr. 52: Detail 2 porovnání délky dráhy programu bez cyklu 832 a programem s cyklem 832 a bez F	58
Obr. 53: Porovnání programu COMPCAD a COMPOF.....	59
Obr. 54: Porovnání délky dráhy programu s COMPCAD a COMPOF	60
Obr. 55: Detail 1 porovnání délky dráhy programu s COMCAD a COMPOF.....	60
Obr. 56: Detail 2 porovnání délky dráhy programu s COMCAD a COMPOF.....	61

Seznam tabulek

Tab. 1: Naměřené časy z experimentu [3].....	32
Tab. 2: Předpokládané časy výroby [7].....	34
Tab. 3: Souhrn pro hrubování	36
Tab. 4: Souhrn pro zbytkové hrubování.....	37
Tab. 5: Souhrn pro dokončení	38
Tab. 6: Souhrn vypočítaných hodnot pro optimalizaci	44
Tab. 7: Tabulka doby trvání hrubování bez cyklu 832	49

Tab. 8: Tabulka doby trvání hrubování s cyklem 832 a bez F	49
Tab. 9: Tabulka doby trvání hrubování s FNORM	49
Tab. 10: Tabulka doby trvání hrubování s FLIN	50
Tab. 11: Tabulka doby trvání hrubování s FCUB	50
Tab. 12: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování bez cyklu 832.....	53
Tab. 13: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování s cyklem 832 a bez F	53
Tab. 14: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování s FNORM	54
Tab. 15: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování s FLIN.....	55
Tab. 16: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování s FCUB	55
Tab. 17: Tabulka celkového porovnání programů	57
Tab. 18: Tabulka porovnání COMPCAD a COMPOF	61
Tab. 19: Tabulka celkového porovnání ujeté vzdálenosti.....	62

1 Úvod

Optimalizace posuvové rychlosti je v dnešní době velmi zajímavé téma pro zkoumání. Aktuální trendy ve výrobě se snaží o zvýšení produktivity výroby při zachování stejné či lepší jakosti obrobku. V obecné míře je aplikováno velké úsilí k dosažení co nejúspornějšího procesu výroby. K tomu může sloužit právě optimalizace posuvové rychlosti, která má na zmíněné problémy značný vliv. Dále může mít pozitivní vliv na zvýšení životnosti obráběcího nástroje či na mechanické části samotného CNC stroje. K optimalizaci posuvové rychlosti lze použít speciální funkce nabízené řídicími systémy, či speciální software určený k optimalizaci NC programu.

Hlavním cílem této diplomové práce bude snaha ověřit předpoklady předcházející práce „Nástroje systému Sinumerik pro posuvovou rychlost a jejich praktické využití“ při reálném obrábění. Zmíněná kvalifikační práce zkoumala vliv nastavení nástrojů systému Sinumerik pro posuvovou rychlost, jmenovitě funkce FNORM, FLIN a FCUB. Výsledkem práce bylo, že funkce FLIN dosahovala snížení času přibližně o 30 %, FCUB dosahovala zhruba 22 % a funkce FNORM byla použita jako etalon měření. Je vhodné také zmínit, že tyto hodnoty byly naměřeny na velmi teoretickém experimentu. Z toho důvodu vznikla tato diplomová práce, která chce tyto zmíněné poznatky prozkoumat v reálných podmínkách obrábění. Dále bude využito poznatků z diplomové práce na téma „Optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos“ při tvorbě a optimalizaci NC programu pomocí optimalizačního softwaru Eureka for Chronos.

2 Definice cílů

Jak již bylo zmíněno v úvodu, primárním cílem této diplomové práce bude snaha o ověření předpokladů předcházející práce na téma „Nástroje systému Sinumerik pro posuvovou rychlost a jejich praktické využití“ při reálném obrábění. Cílem je praktické ověření chování optimalizovaného NC programu, který bude optimalizovaný pomocí softwaru Eureka for Chronos při reálném obrábění tvarově složitého dílce. Dalším cílem diplomové práce bude zkoumat vliv nastavení nástrojů Sinumeriku pro posuvovou rychlost FNORM, FLIN a FCUB na reálné součásti při reálných podmínkách. V neposlední řadě bude zkoumán vliv nastavení CNC stroje pomocí cyklu 832, který v sobě obsahuje funkce G645 a kompresor NC bloků. Porovnáním výsledků experimentů bude zjištěno, zda poznatky z předchozích kvalifikačních prací jsou přínosem i v reálné praxi.

3 Rozbor současného stavu

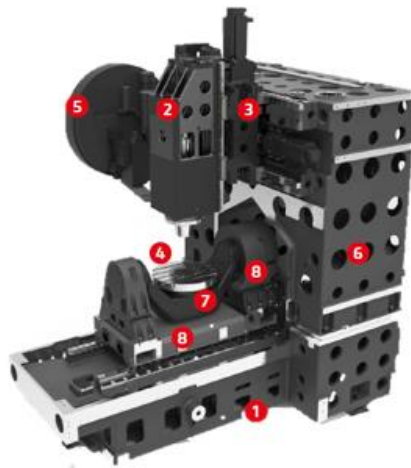
Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, tato diplomová práce navazuje na bakalářskou práci na téma „Nástroje systému Sinumerik pro zvýšení posuvové rychlosti a jejich praktické využití“, kde byl zkoumán vliv funkcí Sinumeriku FNORM, FLIN a FCUB na změnu posuvové rychlosti. Bude také využito poznatků z diplomové práce „Optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos“. V první řadě ale bude popsán obráběcí stroj MCU450V-5X, jenž bude využit k provedení praktické části diplomové práce. Jako další bude elementárně popsán řídicí systém Sinumerik a v detailu cyklus 832. Dále bude analyzován software Eureka for Chronos, který bude sloužit k optimalizaci NC kódu. Poslední částí rozboru současného stavu bude popis dvou zmíněných vysokoškolských kvalifikačních prací.

3.1 Stroj MCU 450V-5X

Stroj MCU 450V-5X představuje multifunkční 5osé obráběcí centrum vyvinuté českou společností Kovosvit MAS, která se pyšní více než 80letou tradicí ve výrobě a vývoji obráběcích strojů. Toto obráběcí centrum se vyznačuje kontinuálním obráběním v 5 osách s modulárním zásobníkem nástrojů a velmi dobrou statickou a dynamickou tuhostí oproti menším rozměrům stroje. [1]

3.1.1 Základní koncepce stroje

Základní koncept stroje ilustruje základní konstrukci a umístění jednotlivých částí stroje, což poskytuje povědomí o charakteru tohoto stroje. Na příslušném schématu jsou tyto základní komponenty stroje vizualizovány a podrobně popsány.

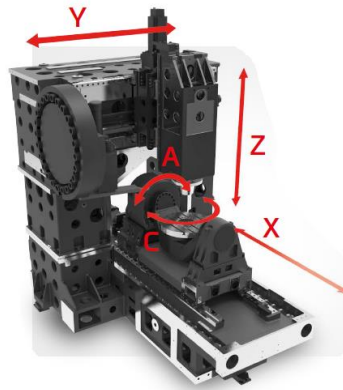


Kde 1) lože, 2) Smykadlo, 3) Saně, 4) Vřeteno, 5) Zásobník nástrojů, 6) Stojan, 7) Pracovní stůl a 8) otočné sklopné osy pracovního posuvu.

Obr. 1: Základní koncept stroje [1]

3.1.2 Lineární a rotační osy

Ilustrace na Obr. 2 poskytuje ukázkou lineárních a rotačních os multifunkčního obráběcího stroje. Hodnoty lineárních a rotačních os jsou pak uvedeny na Obr. 3. Konkrétně osy X, Y a Z reprezentují tradiční lineární pohyby s maximálními rozjezdy v hodnotách 450 mm, 800 mm a 400 mm respektive. Osa A reprezentuje natočení pracovního stolu kolem osy X, s možností maximálního natočení v rozsahu $\pm 120^\circ$. Osa C zase stanovuje směr rotace pracovního stolu kolem osy Z. Další důležité parametry a informace jsou podrobně uvedeny na Obr. 3. [1]



Obr. 2: Lineární a rotační osy [1]

3.1.3 Pracovní prostor

Toto obráběcí centrum umožňuje upnutí součástí s maximálním průměrem 600 mm a výškou 350 mm. Během frézovacích operací je povoleno maximální zatížení pracovního stolu do hodnoty 500 kg, zatímco při soustružení toto zatížení může dosahovat pouze 350 kg. Pracovní stůl může být roztočen (osa C) na maximální otáčky dosahující až 200 otáček za minutu. [1]

3.1.4 Parametry získané ze stroje

Maximální posuvová rychlosti činí 60 000 mm/min. Zrychlení stroje dosahuje až 0,6 g.

3.1.5 Technické parametry

Následující Obr. 3 shrnuje veškeré technické parametry multifunkčního 5osého obráběcího centra MCU 450V-5X. [1]

		MCU 450V-5X frézování	MCU 450VT-5X soustružení
Lineární osy	Pojezd v ose X	mm	450
	Pojezd v ose Y	mm	800
	Pojezd v ose Z	mm	400
	vzdálenost čela včetně od stolu	mm	100-500
	Pracovních posuv v osách X, Y, Z	mm.min ⁻¹	1 - 60 000
	Rychloposuv v osách X, Y, Z	mm.min ⁻¹	60 000
	Zrychlení v osách X, Y, Z	mm.s ⁻²	6 000
	Programovatelný krok	mm	0,001
Rotační osy	pohon osy A, C		Torque motor
	Rozsah naklápění osy A	°	±120
	Rozsah otáčení osy C	°	Neomezeně
	Maximální otáčky osy A	min ⁻¹	100
	Maximální otáčky osy C	min ⁻¹	200
Pracovní stoly	Přesnost dělení os A, C	°	0,001
	Velikost uplnací plochy stolu	mm	500
	Maximální průměr obrodku	mm	600
	Maximální výška obrodku	mm	350
	Maximální zatížení stolu	kg	500
Přesnost ČSN ISO 230-2	Přesnost stavění souřadnic	mm	0,004
	Přesnost najetí	mm	0,007
Přesnost VDI/DGQ3441	Přesnost stavění souřadnic	mm	0,004
	Přesnost najetí	mm	0,007
Přesnost JIS B 6336	Vyhodnocení po dráze	mm	±0,003
	Opakované najetí	mm	±0,002
Energetická přípojení a spotřeba	Napětí AC		3 × 400V, 50Hz
	Jmenovitý proud	A	125
	Celkový max. příkon stroje	kVA	55
	Doporučený přívod elektrovodů	mm ²	5 × 35 Cu
	Pracovní tlak pneumatického zařízení	MPa	0,6
	Spotřeba tlakového vzduchu (min – max)	m ³ /hod	8 - 20
Rozměry strojů	Rozměry stroje	mm	3800 × 3 800 × 3 140
	Přepavní rozměry stroje	mm	3 800 × 2 300 × 2 810
	Hmotnost stroje	kg	14 000
	Počet nástrojů	KS	30 (60)
Zásobník nástrojů	Max. průměr nástroje	mm	80 / 160 (75/130)
	Max. váha nástroje	kg	6,5 (8)
	Max. délka nástroje	mm	300
	Čas výměry nástroje (nástroj – nástroj)	s	2,5 (3)
Řídicí systém			HEIDENHAIN TNC 640
			SIEMENS SIN 840D SL

Obr. 3: Technické parametry [1]

3.2 Sinumerik 840D sl

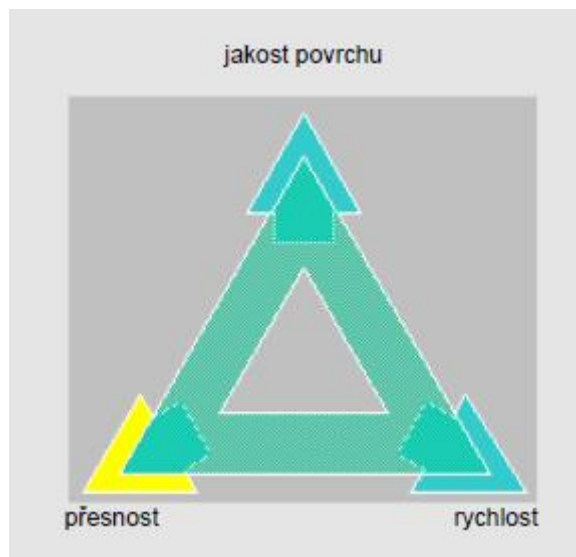
Sinumerik je označení pro řídicí systém vyvinutý společností Siemens AG určený pro NC (Numerical Control) strojů, což jsou technická zařízení používaná v průmyslu k výrobě. Sinumerik představuje značku řídicí technologie, která umožňuje programovat a řídit pohyb nástrojů nebo stolu na CNC strojích na základě digitálních instrukcí. Tento systém nabízí různé verze a konfigurace, které jsou přizpůsobeny specifickým typům NC strojů. [2]

Sinumerik má široké uplatnění v průmyslových odvětvích, včetně významných sektorů, jako je automobilový průmysl, letecký průmysl a energetika. Jeho klíčová role spočívá v dosahování vysoké přesnosti, opakovatelnosti a efektivity ve výrobě a obrábění v průmyslovém prostředí. [2]

3.2.1 Cyklus 832

Pro tuto diplomovou práci bude zásadní také cyklus 832. Tento cyklus udává s jakou rychlostí, přesností či jakostí povrchu by měl stroj provést pracovní cyklus. Programátor rozlišuje mezi čtyřmi technologiemi obrábění, a to obrábění načisto, hrubé obrábění načisto, obrábění nahrubo a deaktivování. Každá z těchto čtyř technologií obrábění má možnost nastavení jiné charakteristiky, již programátor nebo obsluha stroje udává zadáním hodnoty tolerance. Při výběru obrábění nahrubo je kladen důraz na rychlost posuvu v důsledku vyhlazování kontury. Při obrábění načisto je kladen důraz na přesnost kvůli aktivování

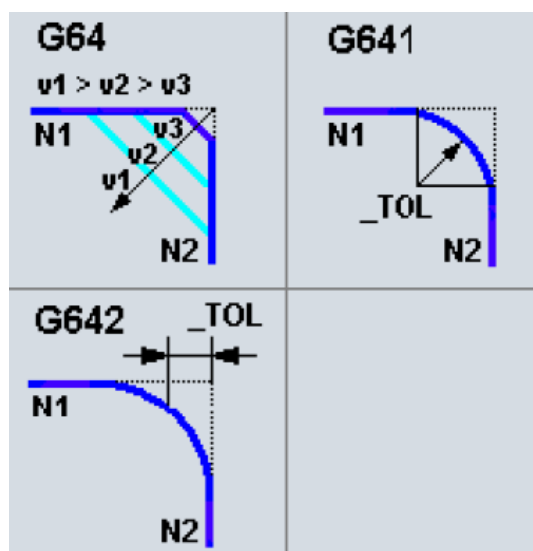
kompresoru NC bloků. V cyklu 832 jsou automaticky zapnuty funkce G645 a kompresor NC bloků COMPCAD. Toto automatické nastavení bylo zjištěno ze stroje MCU450V-5X, který bude využit k provedení experimentu. [3, 4]



Obr. 4: Možnosti nastavení tolerance cyklu 832 [4]

3.2.1.1 Funkce G64, G641 a G642

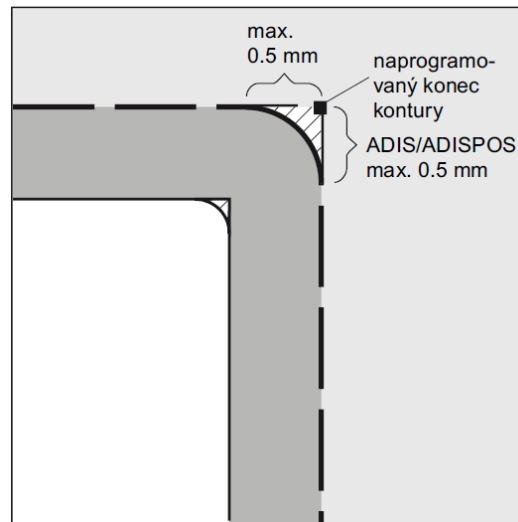
V cyklu 832 lze aktivovat velké množství přídavných funkcí. Tyto funkce se obecně snaží o dosažení co nejvíce kontinuálního pohybu po dráze. Jinak řečeno, slouží k plynulému navazování NC bloků. G64 udává rychlostně plynulý přechod mezi NC bloky, kdy míra odchylny od naprogramované dráhy je přímo úměrná rychlosti pohybu a není závislá na zadané toleranci. Čím je tedy vyšší posuvová rychlost, tím je větší i zkreslení dráhy vlivem funkce G64. Funkce G641 udává tangenciální napojení mezi bloky uvnitř předem zadané hodnoty tolerance kontury. Funkce G642 zajišťuje, o jakou hodnotu tolerance se může řídicí systém odchýlit od původní kontury a začít tvořit zaoblení dráhy. [4, 5]



Obr. 5: Grafická ukázka funkcí G64, G641 a G642 [4]

3.2.1.2 Funkce G643, G644 a G645

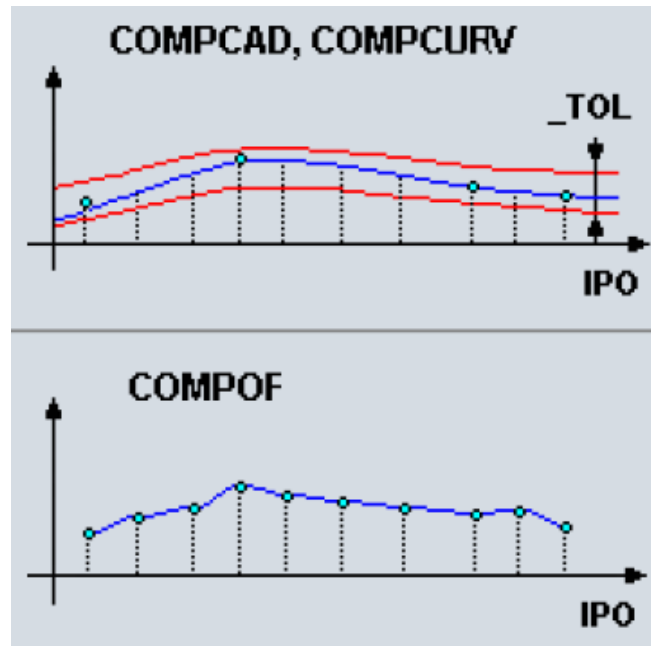
Funkce G643 slouží k internímu přechodovému zaoblení. Lze v kanálových nastavovaných parametrech definovat maximální odchylky od zadané kontury nebo maximální úhlovou odchylku orientace nástroje pro každou osu zvlášť. Funkce G644 ovlivňuje zaoblení přechodů s maximální možnou dynamikou. Konfigurace se opět nastavuje pomocí strojního parametru. Pro tuto diplomovou práci je jednou z nejdůležitějších funkcí funkce G645. Ta udává řízení pohybu po dráze s přechodovým zaoblením v rozích a s tangenciálními přechody mezi jednotlivými bloky NC programu při dodržení nastavených odchylek. Tangenciální přechod mezi jednotlivými NC bloky programu je aktivován pouze tehdy, když minimálně v jedné ose vykazuje průběh zakřivení naprogramované kontury skokovou změnu. [6]



Obr. 6 Grafická ukázka funkce G645 [6]

3.2.1.3 Kompresor NC bloků

Další definovatelnou funkcí je kompresor NC bloků (COMPON, COMPCAD, COMPCURV a COMPOF). Tato funkce obecně aproximuje konturu zadanou lineárními bloky do polynomických bloků. Slouží tedy ke spojitému napojení mezi NC bloky, zvýšení maximální dosažitelné posuvové rychlosti a zmenšení počtu bloků pro naprogramování kontury. U COMPON je na přechodech mezi bloky spojitá pouze rychlost. Zrychlení os, které jsou součástí pohybu, mohou vykazovat skokové změny na hranicích bloků. U COMPCURV je na přechodech mezi bloky spojitě zrychlení. To eliminuje skokové změny na hranicích bloků. U COMPCAD je významná komprese strojního času a paměti řídicího systému. [4, 5]

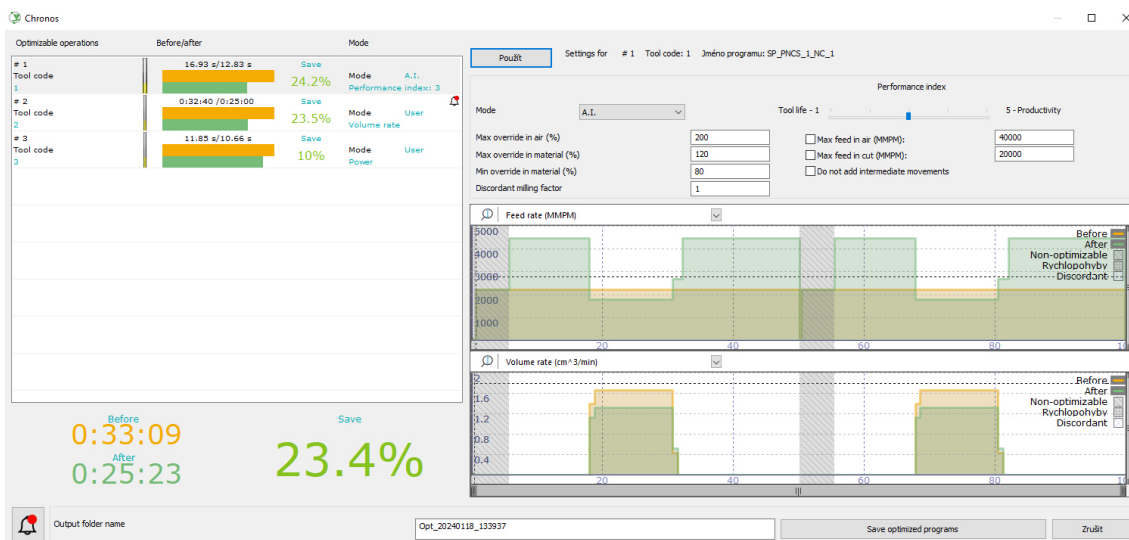


Obr. 7: Grafická ukázka funkce kompresoru [4]

3.3 Eureka for Chronos

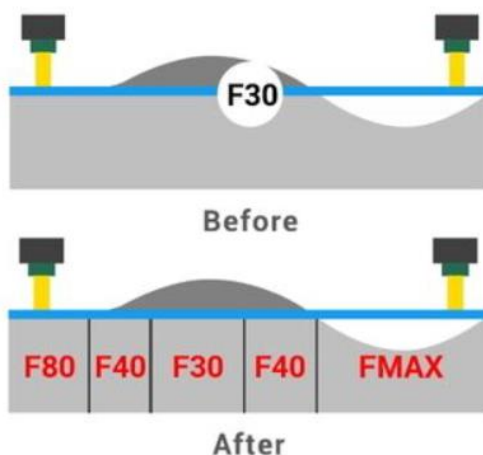
V současné době představují CAM systémy klíčový nástroj pro víceosé obrábění. Tyto systémy umožňují programovat obráběcí operace na základě předem definovaných funkcí, které mohou fungovat v poloautomatickém režimu a generovat řezné dráhy podle definované geometrie, která se dynamicky přizpůsobuje aktuálním podmínkám a tvaru obráběného dílu. Jsou zde také na výběr operace plně řízené uživatelem. Řezné dráhy v těchto systémech jsou vytvářeny na základě implementovaných algoritmů, které analyzují geometrii konkrétního dílu a zajistí, že řezné dráhy jsou flexibilní a přizpůsobitelné tvaru dílu. Dále lze upravovat rychlost pohybu nástroje při jeho vstupu a výstupu z materiálu a přizpůsobovat řezné podmínky aktuálním požadavkům. Většina obráběcích operací vytvořených v CAM systémech pracuje s konstantními hodnotami posuvu. [7, 8]

V této souvislosti se objevuje Eureka for Chronos, specializovaný software (modul) určený k optimalizaci existujícího NC kódu pomocí aktivní úpravy posuvové rychlosti. Tento program je koncipován k optimalizaci soustružení a frézování. Frézovací operace zahrnují frézování ve 3 osách, 4 osách, 5 osách, indexově i souvisle. Významným aspektem je, že Eureka for Chronos je kompatibilní s většinou CAM programů a nepotřebuje specifický CAM systém. [7, 8]



Obr. 9: Ukázka prostředí po simulaci Eureka for Chronos

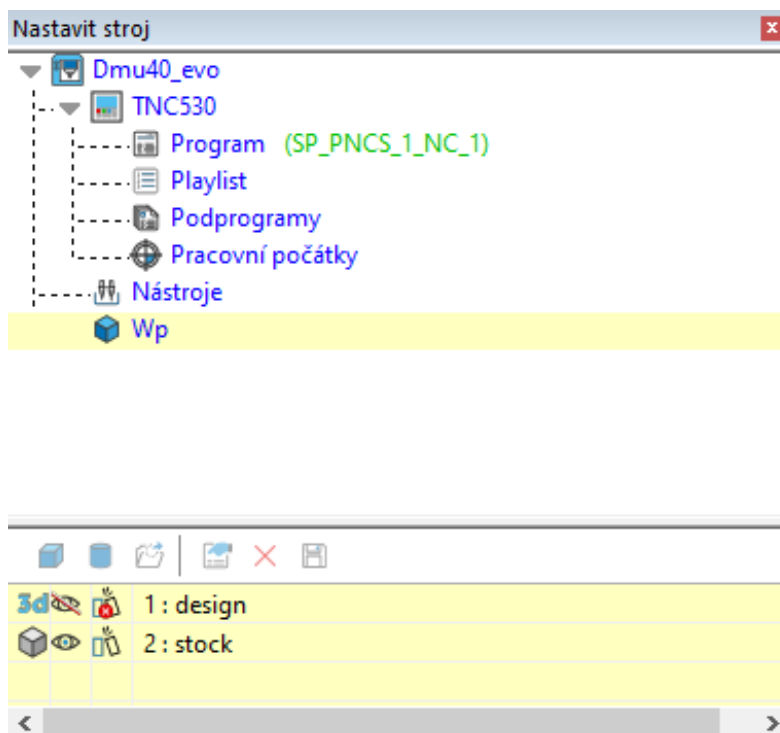
„Eureka Chronos pracuje s finálním NC programem, který se používá na obráběcím stroji. Chronos modifikuje posuvy v originálním NC programu. Pokud geometrie dráhy obsahuje dlouhý pohyb řízený jedním řádkem (dlouhý lineární řez), Eureka Chronos ho rozdělí do více částí (řádků) aby mohla realizovat různé posuvy (akceleraci a deceleraci). Geometricky ale dráha bude 100% stejná jako originální.“ [10] Viz Obr. 10.



Obr. 10: Ukázka posuvové rychlosti před a po optimalizaci [10]

3.3.1.1 Nastavení stroje

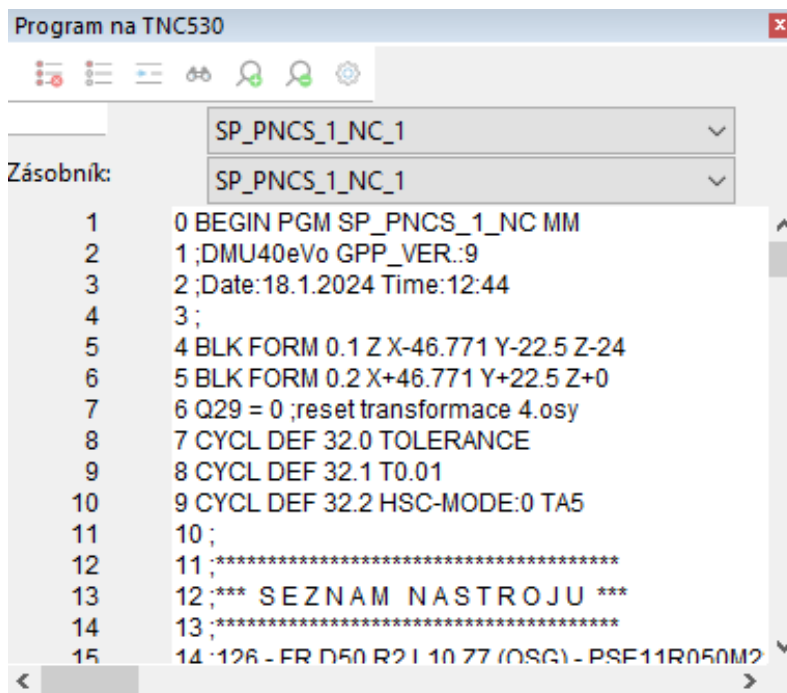
Toto okno je rozděleno na dvě okna. Horní ukazuje možné funkce, které mohou být užitečné pro konfiguraci stroje. Dolní okno se aktivuje pouze pro funkci workpiece (WP), kde se objeví další možnosti nastavení. Horní okno se dále rozvětňuje na program, playlist, pracovní počátek a nástroje. Playlist umožní přidat do fronty více NC programů určených k simulaci. Pracovní počátek umožní upravit nebo přidat nulové body. Kolonka nástrojů vede do nastavení a úprav nástrojů. [11]



Obr. 11: Ukázka okna nastavení stroje

3.3.1.2 Program okno

Program okno slouží k nahlédnutí a modifikaci NC kódu, kde je možné pomocí jednoduchých funkcí vytvářet tzv. *breakpointy* sloužící k zastavení simulace na určitém řádku NC kódu. Lze také pomocí *Go to line* a *Finds a text* přeskokovat na požadované řádky a hledat text v NC kódu. [11]



Obr. 12: Ukázka program okna

3.3.2 Metody optimalizace

Eureka for Chronos poskytuje výjimečnou všestrannost při použití optimalizace. Každý obráběcí proces je unikátní a jsou na něj kladeny různé cíle v oblasti optimalizace. Za účelem plného využití potenciálu stroje a nástroje, nabízí Eureka for Chronos několik metod optimalizace. [7]

Než je ale vybrána vhodná metoda optimalizace, je nejprve nutné zadat mechanické a tepelné vlastnosti obráběného materiálu. Veškeré vlastnosti, které je třeba zadat, jsou uvedeny na obrázku. Po nastavení zmíněných materiálových vlastností se teprve přechází k nastavení metod optimalizace.

Obr. 13: Ukázka zadávání mechanických a tepelných vlastností materiálu

3.3.2.1 Objemový faktor

První metoda optimalizace je využití objemového faktoru, která slouží k dosažení konstantního úběru materiálu za jednotku času. Na Obr. 14 je ukázka možného nastavení. Hlavní hodnotou, kterou lze nastavit je objemový faktor. Ten je udáván v cm^3/min . Další hodnota, již lze nastavit je například *Max override in air (%)*, ta vyjadřuje maximální procentuální přírůstek rychloposuvu. Dále *Max/Min override in material (%)* znamená maximální nebo minimální procentuální přírůstek pohybu v pracovním posuvu. Další možnosti nastavení jsou *Max feed in air/cut (MMPM)* a ty vyjadřují maximální posuvovou rychlost rychloposuvu nebo pracovního posuvu v mm/min . *Discordant miling factor* znamená v překladu nesousledný faktor frézování. [12]

Obr. 14: Ukázka zadání hodnot pro metodu objemového faktoru

3.3.2.2 Tloušťka třísky

Tato metoda slouží k dosažení konstantní tloušťky třísky. Opět si na Obr. 15 lze všimnout, že lze nastavit několik parametrů. Avšak možnosti se oproti objemovému faktoru nemění. Změna je pouze v tloušťce třísky v mm. [12]

Mode	User	Chip thickness (mm)	0.1
Max override in air (%)	200	<input type="checkbox"/> Max feed in air (MMPM):	40000
Max override in material (%)	120	<input type="checkbox"/> Max feed in cut (MMPM):	20000
Min override in material (%)	80	<input type="checkbox"/> Do not add intermediate movements	
Discordant milling factor	1		

Obr. 15: Ukázka zadání hodnot pro metodu tloušťky třísky

3.3.2.3 Výkon a točivý moment

Další dvě metody slouží k maximálnímu využití obráběcího stroje. Tyto dvě metody se opět odlišují pouze hlavní možností nastavení, a to zadáním výkonu v kW a točivým momentem v Nm. Zmíněné metody se především hodí k hrubovacím operacím. [12]

Mode	User	Power (kW)	5
Max override in air (%)	200	<input type="checkbox"/> Max feed in air (MMPM):	40000
Max override in material (%)	120	<input type="checkbox"/> Max feed in cut (MMPM):	20000
Min override in material (%)	80	<input type="checkbox"/> Do not add intermediate movements	
Discordant milling factor	1		

Obr. 16: Ukázka zadání hodnot pro metodu výkonu

3.3.2.4 Kombinace

Jak je patrné z Obr. 17, předposlední metodou je kombinace zmíněných funkcí, ta je vhodná zejména pro případy, kdy chce uživatel kontrolovat více parametrů najednou. [7]

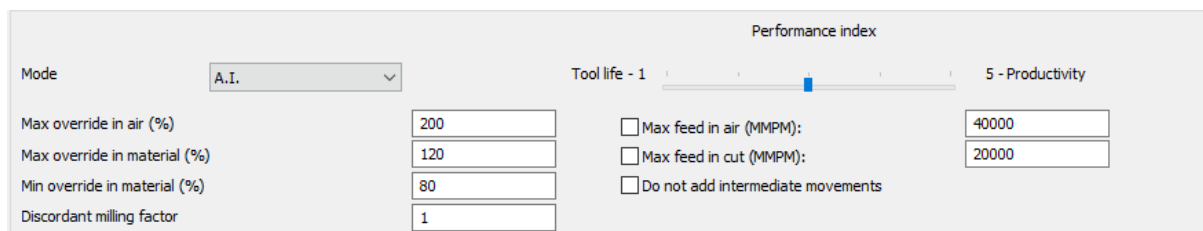
Mode	User	Multi-objective	
Max override in air (%)	200	<input type="checkbox"/> Max feed in air (MMPM):	40000
Max override in material (%)	120	<input type="checkbox"/> Max feed in cut (MMPM):	20000
Min override in material (%)	80	<input type="checkbox"/> Do not add intermediate movements	
Discordant milling factor	1		
Volume rate (cm ³ /min):	<input type="checkbox"/> Optimization	50	<input type="checkbox"/> Limit 70
Chip thickness (mm):	<input type="checkbox"/> Optimization	0.1	<input type="checkbox"/> Limit 0.2
Power (kW):	<input type="checkbox"/> Optimization	5	<input type="checkbox"/> Limit 20
Torque (Nm):	<input type="checkbox"/> Optimization	5	<input type="checkbox"/> Limit 20

Obr. 17: Ukázka zadání hodnot pro metodu kombinace

3.3.2.5 A.I.

Ačkoli Eureka for Chronos označuje poslední metodu optimalizace jako A.I., tedy jako umělou inteligenci, nejedná se o umělou inteligenci v pravém slova smyslu. Jde pouze o velmi pokročilý algoritmus. U této metody je opět nastavení hodnot stejné jako u předchozích metod optimalizace až na jednu výjimku a tím je *performance index*. Tento index je rozdělen do pěti nastavení. Nastavení označené číslem 1 udává, že optimalizace bude klást největší ohled na

životnost nástroje. Nastavení označené číslem 5 udává, že optimalizace bude klást největší ohled na produktivitu obrábění. [7, 12]



Performance index	
Mode	A.I.
Tool life - 1	5 - Productivity
Max override in air (%)	200
Max override in material (%)	120
Min override in material (%)	80
Discordant milling factor	1
<input type="checkbox"/> Max feed in air (MMPM):	40000
<input type="checkbox"/> Max feed in cut (MMPM):	20000
<input type="checkbox"/> Do not add intermediate movements	

Obr. 18: Ukázka zadání hodnot pro metodu A.I.

3.4 Analýza předchozích prací

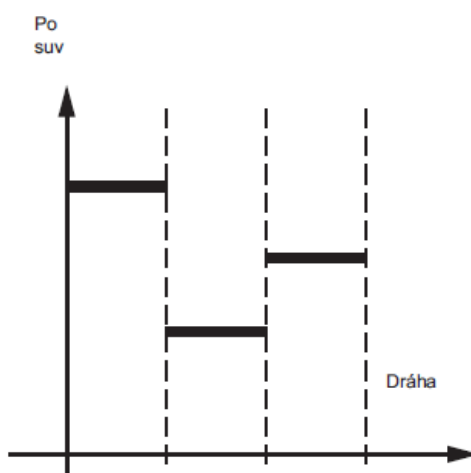
V této části diplomové práce budou shrnuty základní poznatky ze zmíněné bakalářské práce na téma „Nástroje systému Sinumerik pro zvýšení posuvové rychlosti a jejich praktické využití“, kde byl zkoumán vliv nástrojů systému Sinumerik (FNORM, FLIN a FCUB) na změnu posuvové rychlosti. A z diplomové práce na téma „Optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos“, kde hlavním cílem práce bylo aplikovat softwarovou optimalizaci na vytvořené NC kódy pro vybrané díly.

3.4.1 Nástroje systému Sinumerik pro zvýšení posuvové rychlosti a jejich praktické využití

Možnosti nastavení posuvové rychlosti v systému Sinumerik zahrnují následující funkce, které budou následně detailně popsány. Tyto funkce lze programovat jako lineární nebo kubické průběhy posuvu, a to umožňuje flexibilní nastavení rychlosti pohybu a umožňuje plynulé změny zrychlení posuvu bez náhlých trhavých pohybů. Funkce FNORM, FLIN a FCUB slouží k definování, kdy má řídicí systém přecházet mezi jednotlivými hodnotami posuvové rychlosti. [3]

3.4.1.1 FNORM

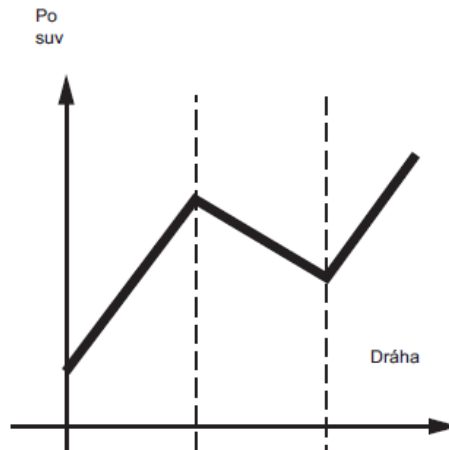
„Hodnota posuvu se zadává prostřednictvím dráhového úseku daného bloku a potom platí jako modální hodnota.“ [13] Řídicí systém začne měnit posuvovou rychlost teprve tehdy, když je tato změna naprogramována. Modální funkce znamená, že po jejím vyvolání zůstává aktivní, dokud není deaktivována.



Obr. 19: Grafická ukázka posuvové rychlosti funkce FNORM [13]

3.4.1.2 FLIN

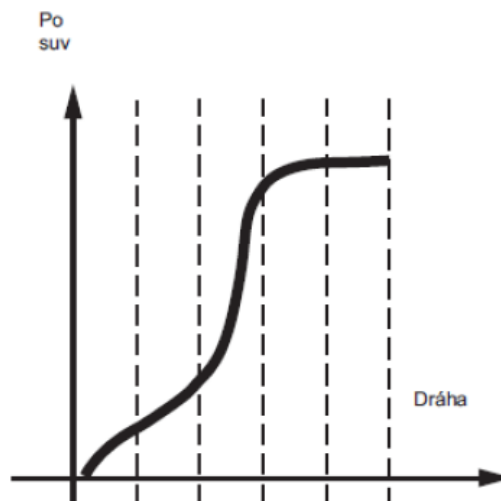
„Hodnota posuvu se z hodnoty aktuální na začátku bloku do hodnoty na konci bloku po celém úseku dráhy lineárně mění a potom platí jako modální hodnota.“ [13] Řídicí systém začne změnu posuvové rychlosti řešit s předstihem.



Obr. 20: Grafická ukázka posuvové rychlosti funkce FLIN [13]

3.4.1.3 FCUB

„Hodnota posuvu se bude měnit od momentální hodnoty posuvu až do naprogramovaného F-slova podle kubické funkce, přičemž této hodnoty bude dosaženo na konci bloku. Řídicí systém pomocí splinových funkcí pospojuje všechny hodnoty posuvu naprogramované pomocí příkazu FCUB s blokovou platností. Hodnoty posuvu přitom slouží jako uzlové body pro výpočet splinové interpolace.“ [13] Řídicí systém začne změnu posuvové rychlosti řešit s předstihem.



Obr. 21: Grafická ukázka posuvové rychlosti funkce FCUB [13]

3.4.1.4 Popis experimentu

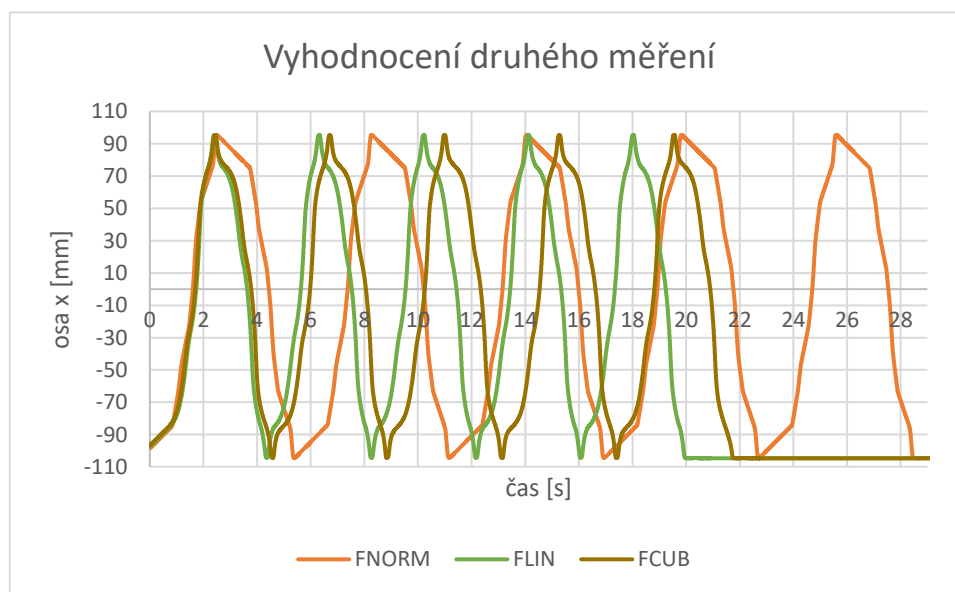
Byl navržen experiment s cílem zkoumat reakci CNC stroje na změny posuvové rychlosti, přičemž byly využity charakteristiky posuvu FNORM, FLIN a FCUB. Pro tento experiment byla naprogramována lineární dráha přejezdu o délce 200 mm, která probíhala od +100 mm do -100 mm pouze v ose x. Jedna délka přejezdu byla rozdělena do 10 úseků po 20 mm s tím, že na každém úseku byla odlišná hodnota posuvové rychlosti. Kompletní měření jedné funkce se tedy skládalo z deseti přejezdů. [3]

Dále, během druhého a třetího měření, byl přidán cyklus CYCLE 832, který definuje s jakou přesností, rychlostí a jakostí povrchu by měl stroj vykonávat jednotlivé interpolace, resp. jejich vzájemné napojení. Programátor má možnost vybrat mezi čtyřmi hlavními režimy: obrábění načisto, předdokončení, hrubování a deaktivaci. Každý z těchto režimů je možné ovlivnit nastavením hodnoty maximální přípustné odchylky. Dále cyklus 832 obsahuje funkci G64, která slouží k dosažení co nejplynulejšího pohybu po dráze, což má za následek plynulejší navazování NC bloků. [3, 4]

Celý experiment probíhal bez reálného obrábění, přičemž veškerá data pro analýzu byla získána ze stroje. [3]

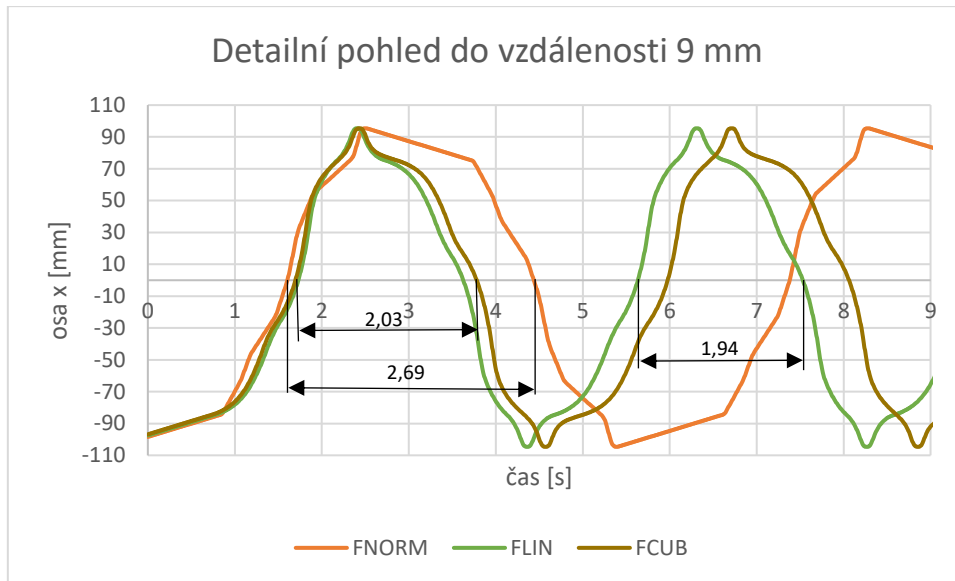
3.4.1.5 Ukázka vyhodnocení experimentu

Pro účel ukázky vyhodnocení experimentu bylo zvoleno druhé měření, kde se do programu implementoval cyklus CYCLE832 s tolerancí 0,1 mm. Na základně naměřených hodnot byly vytvořeny grafy závislosti polohy osy x na čase. [3]



Obr. 22: Graf závislosti polohy osy x na čase při vyhodnocení funkcí z druhého měření [3]

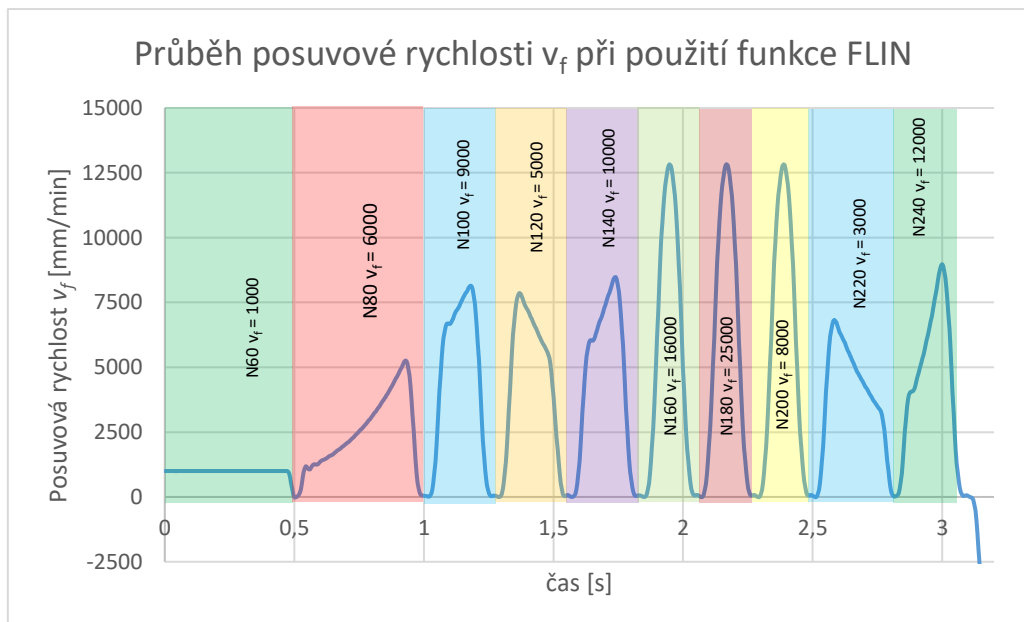
Počátečním krokem bylo měření hodnot posuvové rychlosti s aktivovanou funkcí FNORM společně s CYCLE832 nastaveným na toleranci 0,1 mm. Během průběhu experimentu nebyly zaznamenány žádné výrazné problémy, jako trhavé pohyby stroje či nežádoucí vibrace. Z obrázků Obr. 22 a Obr. 23 je zřejmé, že funkce FCUB, FLIN a FNORM měly téměř identický průběh křivky až do první změny směru. V tomto bodě se projevila nevýhoda funkce FNORM, kdy přes aktivovaný cyklus CYCLE832, tato funkce nedokáže rychle změnit hodnotu posuvové rychlosti. [3]



Obr. 23: Detailní pohled na graf závislosti polohy osy x na čase při vyhodnocení funkcí z druhého měření [3]

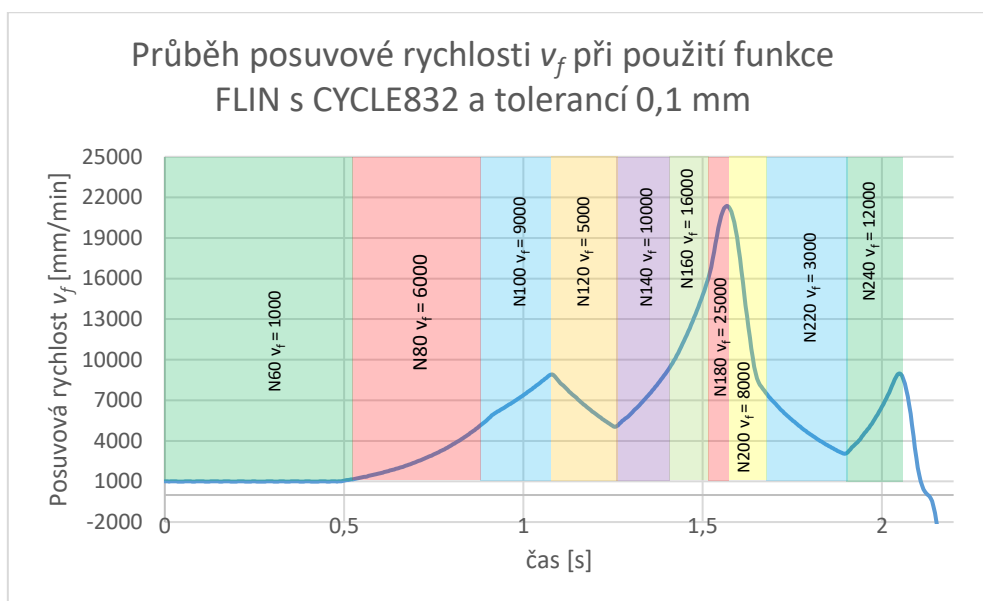
Během pohybu stroje při použití funkce FLIN nebyly pozorovány žádné trhavé pohyby či vibrace. Křivka průběhu pohybu byla prakticky totožná s FCUB, s výjimkou toho, že FLIN dle charakteristiky zvládá lépe změny směru než FCUB a mnohem lépe než FNORM. U funkce FCUB se opět nevyskytovaly trhavé pohyby nebo vibrace stroje, obdobně jako v předchozích dvou případech. Jak u FCUB, tak u FLIN byl zaznamenán plynulejší průběh křivky ve srovnání s FNORM, což vedlo ke kratšímu trvání a hladšímu chodu stroje. [3]

Jako další byla posuzována skutečná dosažená posuvová rychlost v jednotlivých NC blocích, které jsou na obrázcích Obr. 24 a Obr. 25 barevně odděleny. [3]



Obr. 24: Graf funkce posuvové rychlosti v_f při použití funkce FLIN v závislosti na čase [3]

Z vizuální analýzy Obr. 25 lze vyvodit, že stroj vykazoval trhavé pohyby a vibrace při použití funkce FLIN bez cyklu CYCLE 832. Toto chování bylo způsobeno snížením posuvové rychlosti na nulu při přechodu na následující NC blok. FLIN s cyklem CYCLE832 dosahovala výrazně plynulejšího a rychlejšího přechodu posuvové rychlosti, tudíž stroj nevykazoval trhavé pohyby či vibrace. Jak je z Obr. 24 a Obr. 25 vidět, tak stroj ani v jednom případě nedosáhl předepsaných hodnot posuvové rychlosti. Nedosažení těchto hodnot bylo pravděpodobně způsobeno velkými rozdíly mezi za sebou jdoucími hodnotami rychlosti posuvu a nedostatečným odstupem mezi nimi. Řešením by mohlo být zmenšení těchto rozdílů nebo zvýšení vzdálenosti mezi body změny rychlosti posuvu. [3]



Obr. 25: Graf funkce posuvové rychlosti v_f při použití funkce FLIN s CYCLE832 a tolerancí 0,1 mm [3]

Z výsledků uvedených v Tab. 1 lze vyčíst několik důležitých poznatků. První měření ukázalo, že nejdelšího času dosahovala funkce FNORM, zatímco funkce FLIN a FCUB dosahovaly téměř identických časů, lišily se jen přibližně o dvě sekundy. Druhé měření, které zahrnovalo cyklus CYCLE 832 s tolerancí 0,1 mm, vedlo ke zkrácení doby u všech tří funkcí. Funkce FNORM byla rychlejší o téměř 7 sekund, zatímco FLIN a FCUB dosáhly zkrácení času přibližně o 10 sekund. Třetí měření s použitím cyklu CYCLE 832 s tolerancí 0,01 mm naopak prodloužilo dobu přejezdů kvůli menší toleranci. Toto prodloužení bylo však minimální. [3]

Tab. 1: Naměřené časy z experimentu [3]

Měření	FNORM	FLIN	FCUB
1.	37,15 [s]	29,78 [s]	32,06 [s]
2.	28,19 [s]	19,62 [s]	21,78 [s]
3.	28,21 [s]	19,65 [s]	21,94 [s]

3.4.1.6 Získané poznatky z analýzy předchozích prací

Z experimentu vyplývá, že k dosažení požadované posuvové rychlosti je rozhodující nejen charakteristika posuvu, ale i použití cyklu CYCLE832. Experiment ukázal, že bez tohoto cyklu stroj nebyl schopen dosáhnout plynule požadované posuvové rychlosti u žádné z testovaných funkcí. Přidáním cyklu CYCLE832 s nastavenou tolerancí 0,1 mm došlo ke zlepšení výsledků u všech tří funkcí, což se projevilo v čase i v přesnosti dosažení požadované rychlosti posuvu. Snížením tolerance na hodnotu 0,01 mm se časy mírně zhoršily, ale výrazně to nepostihlo dosažení požadovaných hodnot posuvu. [3]

Tato zjištění mají praktické uplatnění při programování součástí, kde je klíčová přesnost. Plynulý posuv umožňuje dosáhnout vyšší kvality povrchu obrobku. V případě hromadné výroby může správné programování vést ke značným úsporám v čase výroby a zefektivnění celého výrobního procesu. Souvislý posuv stroje přispívá k delší životnosti mechanických částí CNC stroje, neboť méně zatěžuje pohyblivé součásti z hlediska mechaniky. [3]

3.4.2 Optimalizace NC kódu pomocí Eureka for Chronos

Tato diplomová práce, měla za cíl zanalyzovat a popsat optimalizaci NC kódu pomocí softwaru Eureka for Chronos. V teoretické části byla popsána tvorba NC programu za užití softwaru SolidCAM a poté již zmíněná optimalizace NC kódu softwarem Eureka for Chronos. [7]

V praktické části byly vytvořeny NC programy pro dva díly, které následně optimalizovány dvěma různými způsoby. Prvním byla optimalizace pomocí A.I. a poté pomocí uživatelem zadaných hodnot. Tvorba optimalizace NC programů přinesla hned několik zajímavých poznatků, které jsou popsány v nadcházející podkapitole 3.4.2.1 a Tab. 2 zobrazuje číselné výsledky experimentu. [7]

3.4.2.1 Poznatky získané z tvorby optimalizovaných NC programů

Optimalizací dílů 1 a 2 dle předpokladů bylo dosaženo úspory časů v rozmezí 10-30% a to jak pomocí uživatelských omezení, tak i v případě A.I. V případě uživatelských omezení dochází k linearizaci hodnoty, dle níž byla optimalizace prováděna. Značný vliv na úsporu času měl také performance index u optimalizační metody A.I. Jak bylo předpokládáno, tak vyšší hodnoty úspory času bylo dosaženo u dílu 2, který má větší počet tvarových ploch. Z toho vyplývá, že největší uplatnění Eureka for Chronos nachází u dílů s větším počtem tvarových ploch, jako jsou například formy. Dále bylo také potvrzeno, že při optimalizaci jsou původní NC bloky rozděleny do většího počtu řádků s jinou hodnotou posuvové rychlosti. To zajišťuje harmonizaci silových špiček. Hodnoty rozestupu mezi NC bloky jsou dány pomocí matematické řady. V optimalizovaném programu, byly také objeveny neoptimalizované úseky a to u nájezdů a sestupů nástroje dle šroubovice, u operací s korekcí. Navíc byly objeveny neoptimalizované úseky, kde nebyly nalezeny žádné spojitosti ani vysvětlení. Dále byla odhalena neshoda s vypočítanými hodnotami množství odebraného materiálu za čas Q a výkonu P s hodnotami uvedenými v Eureka for Chronos. [7]

Tab. 2: Předpokládané časy výroby [7]

Model	Předpokládaný čas výroby		Úspora času [h]: [min]: [s]	Úspora času [%]
	Před optimalizací [h]: [min]: [s]	Po optimalizaci dle A.I. [h]: [min]: [s]		
Díl 1	0:02:10	0:01:57	0:00:13	10,1
Díl 2	0:30:07	0:24:34	0:05:33	18,5

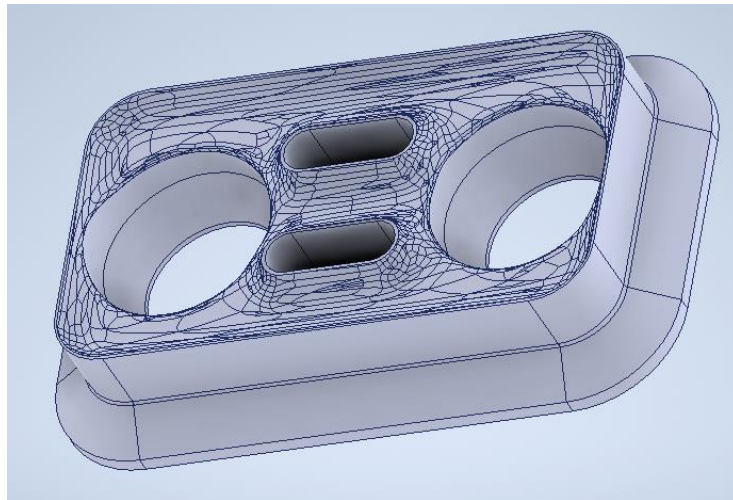
Dalším krokem praktické části bylo vyrobení dílů 1 a 2 pro optimalizovaný (dle A.I.) i neoptimalizovaný NC program na 5osé obráběcí frézce MCU 450 V[T]-5X. Naměřené časy celkově dosahovaly vyšších hodnot než předpokládané. Zajímavostí bylo, že optimalizovaný program dosahoval delších časů než neoptimalizovaný. Při výrobě stroj vykazoval znatelné trhavé pohyby, které způsobovaly vibrace. To bylo připisováno neodladěnému postprocesoru pro zmíněný obráběcí stroj. Dále byl do programu při výrobě, pro snahu snížit nebo eliminovat vibrace, připsán cyklus 832. Tento cyklus výrazně zkrátil časy obrábění a také odstranil vibrace, přesto čas výroby byl delší u optimalizovaného než u neoptimalizovaného programu. [7]

4 Návrh experimentu

V této části diplomové práce bude navržen experiment. V první řadě bude vytvořen NC program pomocí softwaru SolidCAM. Dále budou vypočítány hodnoty, které budou následně použity v rámci optimalizace v softwaru Eureka for Chronos. Poté budou NC programy s přiřazenými funkcemi pro posuvovou rychlost FNORM, FLIN, FCUB a cyklem 832 spuštěny na stroji MCU 450V-5X. Celý experiment bude probíhat bez obrábění.

4.1 Vytvoření NC programu

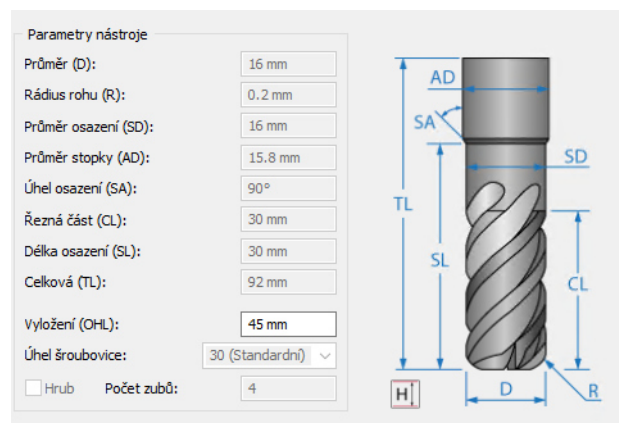
Jak již bylo zmíněno, pro vytvoření NC programu byl použit software SolidCAM. Jako díl k provedení experimentu byla zvolena odhrotovací matrice (Obr. 26). Materiálem je ocel C45 neboli ČSN 12 050. Vzhledem k tvaru zkušební dílu a funkci optimalizačního softwaru byla naprogramována pouze kapsa.



Obr. 26: Odhrotovací matrice

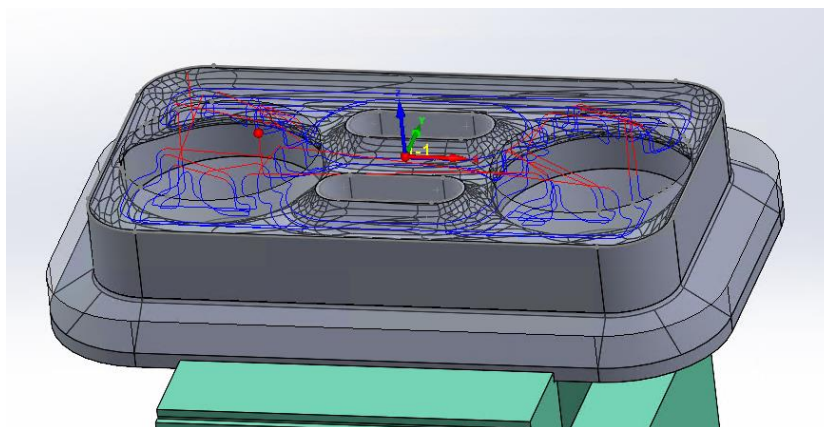
4.1.1 Hrubování

Nejprve bylo přistoupeno k hrubování kapsy. K hrubování byla použita funkce HSR (HM hrubování). HSR je funkce v programovacím softwaru SolidCAM, která označuje vysoce rychlé obrábění. K obrábění byla zvolena toroidní fréza o průměru 16 mm se 4 zuby. Veškeré doplňující informace o nástroji jako jsou například řezná část, délka osazení či rádius zaoblení ostří jsou uvedeny na Obr. 27.



Obr. 27: Použitý nástroj pro hrubování

Obr. 28 ukazuje průběh drah hrubování. Modrá barva značí pracovní posuv neboli samotné obrábění a červená přejezd, výjezd či nájezd. Jak již bylo zmíněno, takto je obráběn pouze vnitřek kapsy. Dále bylo obrábění omezeno na kontury dvou kruhových drážek a dvou drážek oválného tvaru. Toto omezení je platné pro všechny operace.



Obr. 28: Ukázka drah obrábění u hrubování

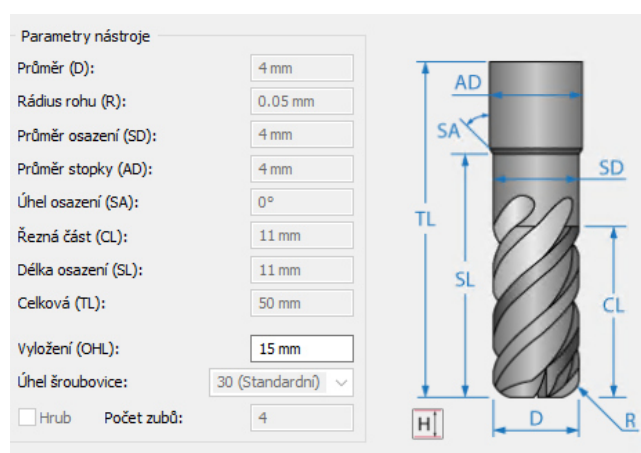
V příložené souhrnné tabulce jsou uvedeny všechny řezné podmínky, které byly zvoleny pro operaci hrubování a budou použity k nadcházejícím výpočtům.

Tab. 3: Souhrn pro hrubování

Nástroj	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_e [mm]	a_p [mm]
FR-D16-Z4	200	0,1	9,6	2

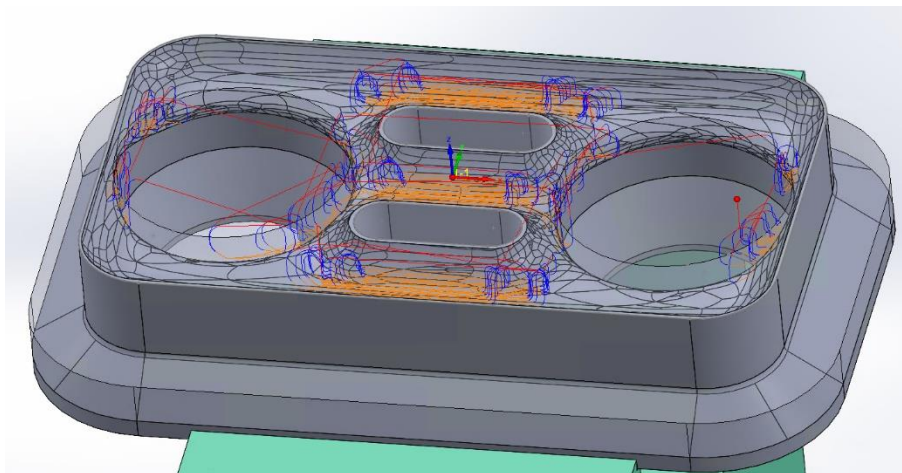
4.1.2 Zbytkové hrubování

Dále byla použita funkce HSR zbytkové hrubování pro dohrubování kapsy, kam se v předchozí operaci nedostal nástroj. Zde byla použita toroidní fréza o průměru 4 mm se 4 zuby. Veškeré doplňující informace o nástroji jako je například řezná část, délka osazení či rádius zaoblení ostří jsou na Obr. 29.



Obr. 29: Použitý nástroj pro zbytkové hrubování

Na Obr. 30 je zobrazen průběh drah u zbytkového hrubování. Červená barva značí rychloposuv, modrá přejezdy mezi záběrem do materiálu a oranžová obrábění.



Obr. 30: Ukázka drah obrábění u zbytkového obrábění

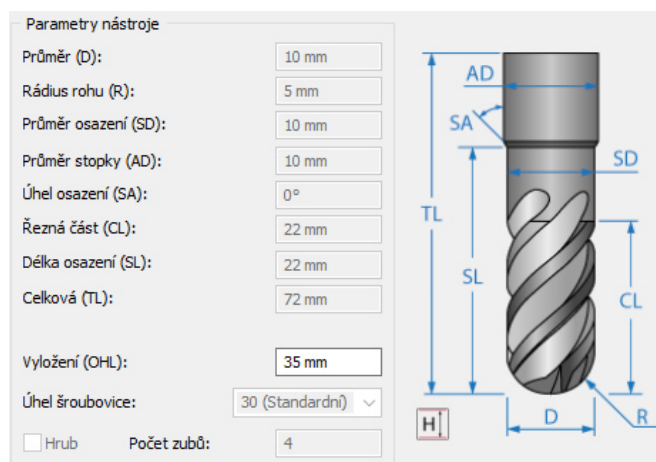
Opět v příložené souhrnné tabulce jsou uvedeny řezné podmínky, které byly zvoleny pro zbytkové hrubování a budou použity pro nadcházející výpočty.

Tab. 4: Souhrn pro zbytkové hrubování

Nástroj	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_e [mm]	a_p [mm]
FR-D4-Z4	160	0,05	1	1,5

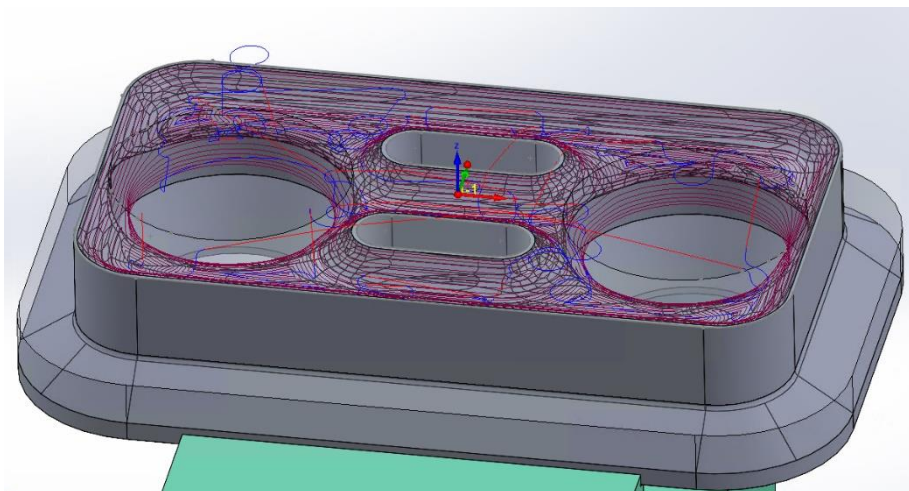
4.1.3 Dokončení

Poslední operací bylo zvoleno dokončování kulovou frézou o průměru 10 mm opět se 4 zuby. U této operace byla použita funkce HSM s hybridní konstantní Z. HSM je funkce v programovacím softwaru SolidCAM, která označuje vysoce rychlé dokončování. Veškeré doplňující informace o nástroji jsou na Obr. 31.



Obr. 31: Použitý nástroj pro dokončení

Obr. 32 ukazuje dráhy při dokončování kapsy. Červená barva značí nájezd nebo výjezd, modrá symbolizuje přejezdy mezi jednotlivými řezy a tmavě červená vyjadřuje obrábění.



Obr. 32: Ukázka drah pro dokončení

Opět v přiložené souhrnné tabulce jsou uvedeny řezné podmínky, které byly zvoleny pro zbytkové hrubování.

Tab. 5: Souhrn pro dokončení

Nástroj	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_e [mm]	a_p [mm]
FR-D10-Z4	220	0,1	1	1

4.2 Výpočty pro optimalizaci

V této části diplomové práce budou vypočítány pomocné hodnoty pro optimalizaci ze všech tří zmíněných operací. Nejprve bude proveden výpočet pro hrubování pak pro zbytkové hrubování a jako poslední bude proveden výpočet pro dokončování.

Optimalizační metody byly zvoleny na základě objemového faktoru a tloušťky třísky. Pro optimalizační metodu tloušťky třísky byl zvolen výpočet střední tloušťky třísky h_m , protože se jedná o vstupní hodnotu, která je zadávána k optimalizaci v Eureka for Chronos. Výpočetní vztah byl použit ze stránek firmy Sandvik [14].

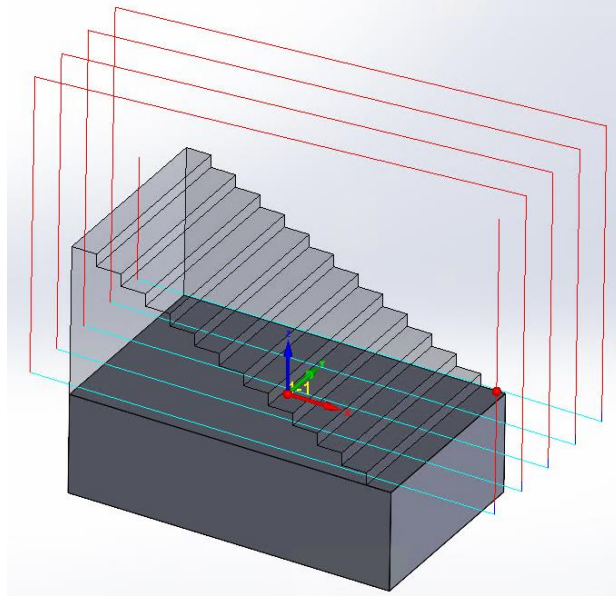
$$h_m = \frac{360^\circ \cdot \sin \kappa_r \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right)} \text{ [mm]} \quad [14] \quad (4.1)$$

4.2.1 Ověření algoritmu pro střední tloušťku třísky

V této kapitole proběhne pokus, zda Eureka for Chronos pracuje při optimalizační metodě tloušťky třísky se střední tloušťkou třísky. Ze vzorce střední tloušťky třísky je evidentní, že střední tloušťka třísky závisí na úhlu nastavení hlavního ostří, který je v tomto případě 90° . Dále na radiální hloubce řezu a_e a průměru nástroje.

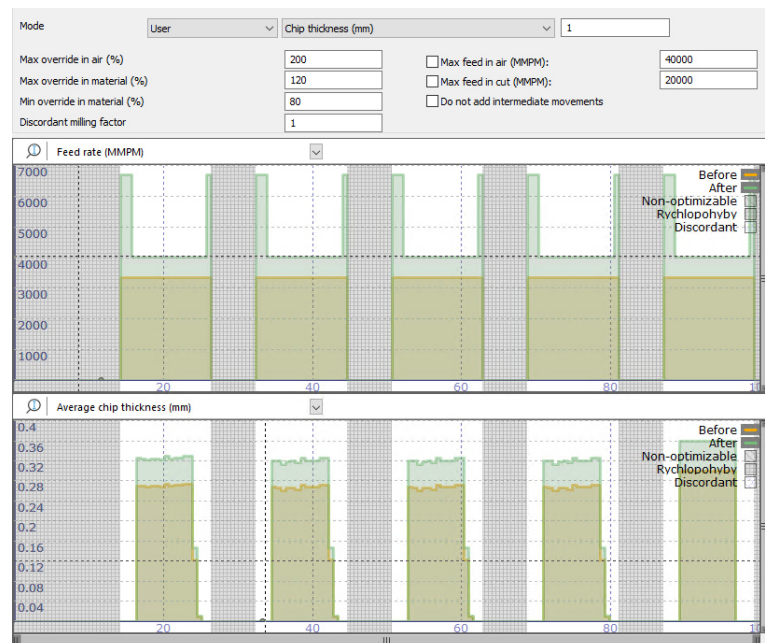
Z toho vyplývá, že na tloušťku třísky nemá vliv axiální hloubka řezu. Byl tedy navržen test, kde probíhal pouze lineární řez se stupňující axiální hloubkou řezu (Obr. 33), kde by měla

Eureka for Chronos udržovat konstantní posuvovou rychlost. Pouze při nájezdu a výjezdu z materiálu se zvýší hodnota posuvové rychlosti, a to z důvodu úhlu záběru.



Obr. 33: Ukázka návrhu testu pro střední tloušťku třísky

Z Obr. 34 je patrné, že Eureka for Chronos opravdu počítá se střední tloušťkou třísky. Graf posuvové rychlosti odpovídá předpokladu. Na vjezdu a výjezdu do materiálu se hodnota posuvové rychlosti zvýšila, ale v řezu hodnota posuvové rychlosti zůstávala konstantní.



Obr. 34: Graf testu posuvové rychlosti při optimalizaci střední tloušťky třísky

4.2.2 Hrubování

Jak již bylo uvedeno, k hrubování byla použita toroidní fréza o průměru 16 mm se 4 zuby.

4.2.2.1 Objemový faktor – Q_1

Pro zjištění objemového faktoru bylo zapotřebí výpočtu průřezu odřezávané vrstvy, otáček a posuvové rychlosti. Tento postup byl aplikován u všech operací stejným způsobem.

Průřez odřezávané vrstvy – A_1

$$A_1 = a_p \cdot a_e \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.2)$$

$$A_1 = 2 \cdot 9,6 = 19,2 \text{ mm}^2 \quad (4.3)$$

kde:

a_p – axiální hloubka řezu = 2 mm

a_e – radiální hloubka řezu = 60% · D = 0,6 · 16 = 9,6 mm

Otáčky – n_1

$$n_1 = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ [ot/min]} \quad (4.4)$$

$$n_1 = \frac{200}{\pi \cdot 0,016} = 3\,978,87 \approx 3\,978 \text{ ot/min} \quad (4.5)$$

kde:

v_c – řezná rychlost = 200 m/min

D – průměr nástroje = 16 mm

Posuvová rychlost – v_{f1}

$$v_{f1} = f_z \cdot z \cdot n_1 \text{ [mm/min]} \quad (4.6)$$

$$v_{f1} = 0,1 \cdot 4 \cdot 3978 = 1591,2 \approx 1\,591 \text{ mm/min} \quad (4.7)$$

kde:

f_z – posuv na zub = 0,1 mm/zub

z – počet zubů = 4 zuby

n_1 – otáčky = 3978 ot/min

Objemový faktor – Q_1

$$Q_1 = A_1 \cdot v_{f1} [\text{mm}^3/\text{min}] \rightarrow [\text{cm}^3/\text{min}] \quad (4.8)$$

$$Q_1 = A_1 \cdot v_{f1} = 19,2 \cdot 1\,591 = 30\,547,2 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} = 30,6 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \quad (4.9)$$

kde:

A_1 – průřez odřezávané vrstvy [mm^2]

v_{f1} – posuvový rychlost [mm/min]

4.2.2.2 Tloušťka třísky – h_{m1}

$$h_{m1} = \frac{360^\circ \cdot \sin \kappa_r \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right)} [\text{mm}] \quad (4.10)$$

$$h_{m1} = \frac{360^\circ \cdot \sin 90 \cdot 9,6 \cdot 0,1}{\pi \cdot 16 \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot 9,6}{16}\right)} = 0,0677 \text{ mm} \quad (4.11)$$

kde:

κ_r – úhel nastavení hlavního ostří, který je 90°

a_e – radiální hloubka řezu = $60\% \cdot D = 0,6 \cdot 16 = 9,6 \text{ mm}$

D – průměr nástroje = 16 mm

4.2.3 Zbytkové hrubování

Pro zbytkové hrubování byla použita toroidní fréza o průměru 4 mm se 4 zuby.

4.2.3.1 Objemový faktor – Q_2

Průřez odřezávané vrstvy – A_2

$$A_2 = a_p \cdot a_e [\text{mm}^2] \quad (4.12)$$

$$A_2 = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ mm}^2 \quad (4.13)$$

kde:

a_p – axiální hloubka řezu = $1,5 \text{ mm}$

a_e – radiální hloubka řezu = 1 mm

Otáčky – n_2

$$n_2 = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ [ot/min]} \quad (4.14)$$

$$n_2 = \frac{160}{\pi \cdot 0,004} = 12\,732,39 \approx 12\,732 \text{ ot/min} \quad (4.15)$$

kde:

v_c – řezná rychlost = 160 m/min

D – průměr nástroje = 4 mm

Posuvová rychlost – v_{f2}

$$v_{f2} = f_z \cdot z \cdot n_2 \text{ [mm/min]} \quad (4.16)$$

$$v_{f2} = 0,05 \cdot 4 \cdot 12\,732 = 2\,546,4 \approx 2\,546 \text{ mm/min} \quad (4.17)$$

kde:

f_z – posuv na zub = 0,05 mm/zub

z – počet zubů = 4 zuby

n_2 – otáčky = 12 732 ot/min

Objemový faktor – Q_2

$$Q_2 = A_2 \cdot v_{f2} \text{ [mm}^3\text{/min]} \rightarrow \text{[cm}^3\text{/min]} \quad (4.18)$$

$$Q_2 = A_2 \cdot v_{f2} = 1,5 \cdot 2\,546 = 3819 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} = 3,8 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \quad (4.19)$$

kde:

A_2 – průřez odřezávané vrstvy [mm²]

v_{f2} – posuvová rychlost [mm/min]

4.2.3.2 Tloušťka třísky – h_{m2}

$$h_{m2} = \frac{360^\circ \cdot \sin \kappa_r \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right)} \text{ [mm]} \quad (4.20)$$

$$h_{m2} = \frac{360^\circ \cdot \sin 90^\circ \cdot 1 \cdot 0,05}{\pi \cdot 4 \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot 1}{4}\right)} = 0,0238 \text{ mm} \quad (4.21)$$

kde:

κ_r – úhel nastavení hlavního ostří, který je 90°

a_e – radiální hloubka řezu = 1 mm

D – průměr nástroje = 4 mm

4.2.4 Dokončení

K dokončení byla využita kulová fréza o průměru 10 mm se 4 zuby.

4.2.4.1 Objemový faktor – Q_3

Průřez odřezávané vrstvy – A_3

$$A_3 = a_p \cdot a_e \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.22)$$

$$A_3 = 1 \cdot 1 = 1 \text{ mm}^2 \quad (4.23)$$

kde:

a_p – axiální hloubka řezu = 1 mm

a_e – radiální hloubka řezu = 1 mm

Otáčky – n_3

$$n_3 = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ [ot/min]} \quad (4.24)$$

$$n_3 = \frac{220}{\pi \cdot 0,010} = 7\,002,81 \approx 7\,002 \text{ ot/min} \quad (4.25)$$

kde:

v_c – řezná rychlost = 220 m/min

D – průměr nástroje = 10 mm

Posuvová rychlost – v_{f3}

$$v_{f3} = f_z \cdot z \cdot n_3 \text{ [mm/min]} \quad (4.26)$$

$$v_{f3} = 0,1 \cdot 4 \cdot 7\,002 = 2\,800,8 \approx 2\,800 \text{ mm/min} \quad (4.27)$$

kde:

f_z – posuv na zub = 0,1 mm/zub

z – počet zubů = 4 zuby

n_3 – otáčky = 7 002 ot/min

Objemový faktor – Q_3

$$Q_3 = A_3 \cdot v_{f3} \text{ [mm}^3/\text{min]} \rightarrow \text{[cm}^3/\text{min]} \quad (4.28)$$

$$Q_3 = A_3 \cdot v_{f3} = 1 \cdot 2\,800 = 2\,800 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} = 2,8 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \quad (4.29)$$

kde:

A – průřez odřezávané vrstvy [mm^2]

v_f – posuvový rychlost [mm/min]

4.2.4.2 Tloušťka třísky – h_{m3}

$$h_{m3} = \frac{360^\circ \cdot \sin \kappa_r \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right)} \text{ [mm]} \quad (4.30)$$

$$h_{m3} = \frac{360^\circ \cdot \sin 90^\circ \cdot 1 \cdot 0,1}{\pi \cdot 10 \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot 1}{10}\right)} = 0,0310 \text{ mm} \quad (4.31)$$

kde:

κ_r – úhel nastavení hlavního ostří, který je 90°

a_e – radiální hloubka řezu = 1 mm

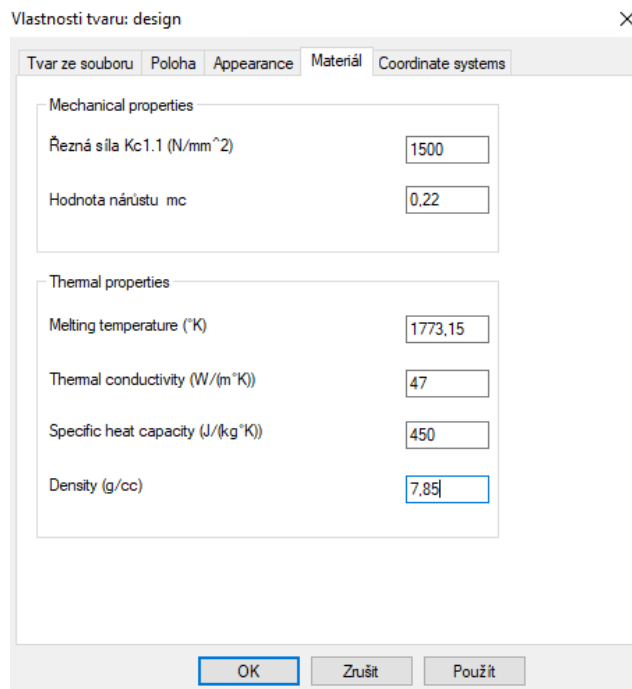
D – průměr nástroje = 10 mm

Tab. 6: Souhrn vypočítaných hodnot pro optimalizaci

	Q [cm^3/min]	h_m [mm]
1. operace – Hrubování	30,6	0,0677
2. operace – Zbytkové hrubování	3,8	0,0238
3. operace – Dokončení	2,8	0,0310

4.3 Nastavení Eureka for Chronos

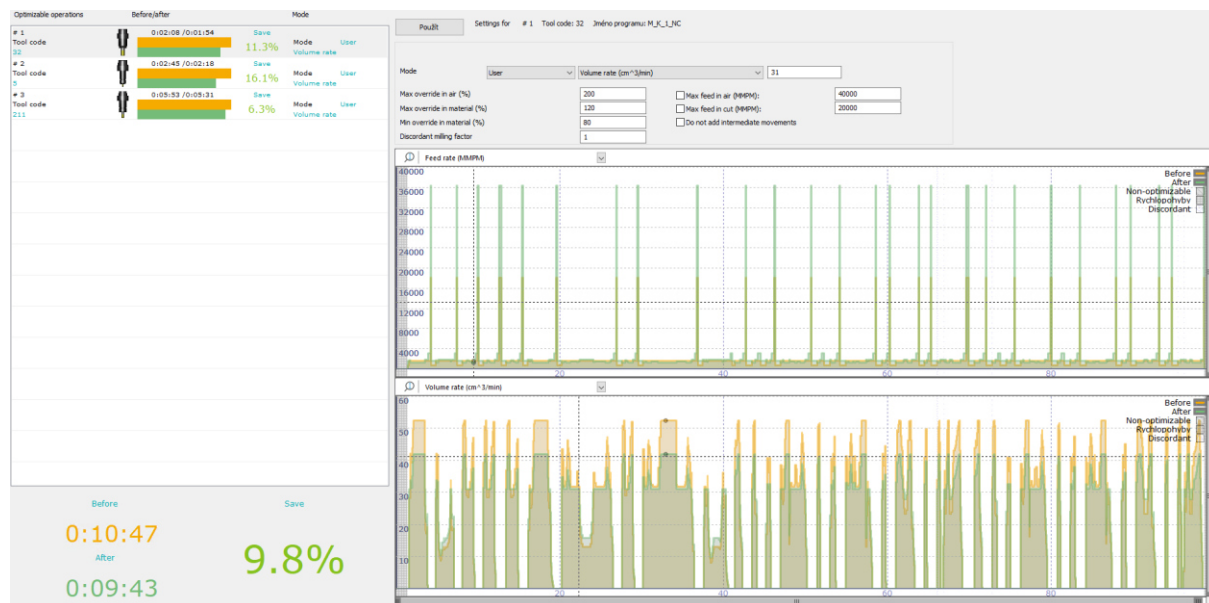
Jak už bylo uvedeno v teoretické části, nejprve je nutné v Eureka for Chronos zadat mechanické a tepelné vlastnosti obráběného materiálu (Obr. 35). Odhrotovací matrice je z oceli C45 neboli ČSN 12 050.



Obr. 35: Vlastnosti materiálu

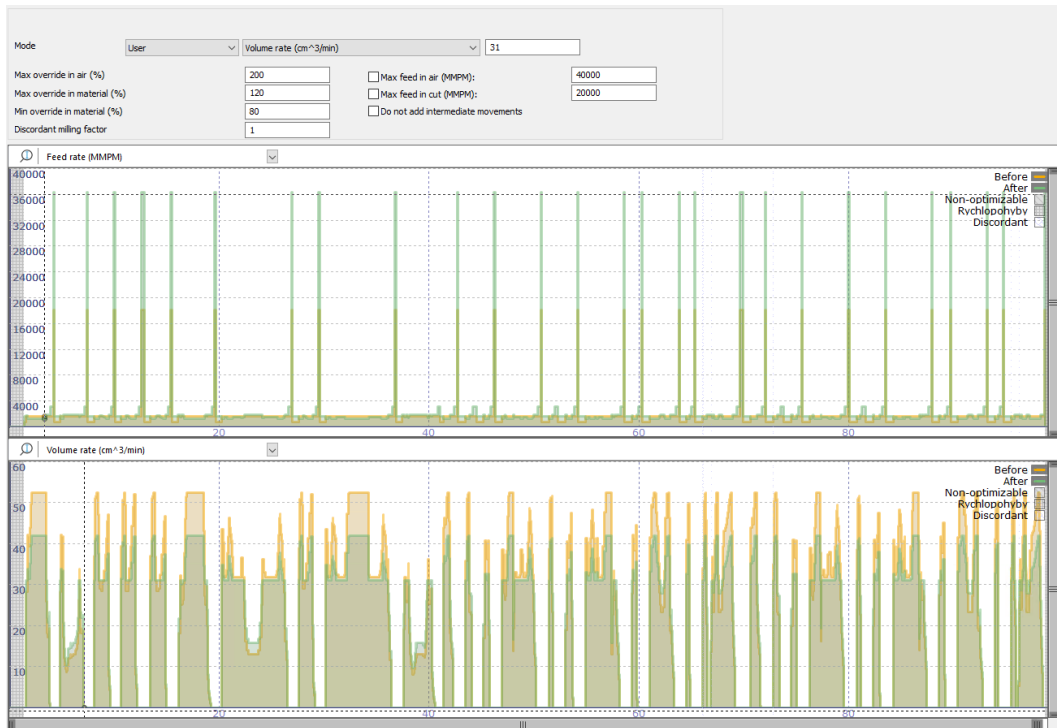
4.3.1 Metoda objemového faktoru

Vypočítané hodnoty byly dosazeny do softwaru Eureka for Chronos pro jednotlivé operace. Obr. 36 ukazuje kompletní ušetřený čas jednotlivých operací. Jmenovitě pro hrubování bylo ušetřeno 11,3 % času. Pro zbytkové hrubování byl čas snížen o 16,1 % a pro dokončování bylo dosaženo úspory času o 6,3 %. Celkové snížení času za všechny operace bylo 9,8 %.



Obr. 36 Metoda objemového faktoru komplet

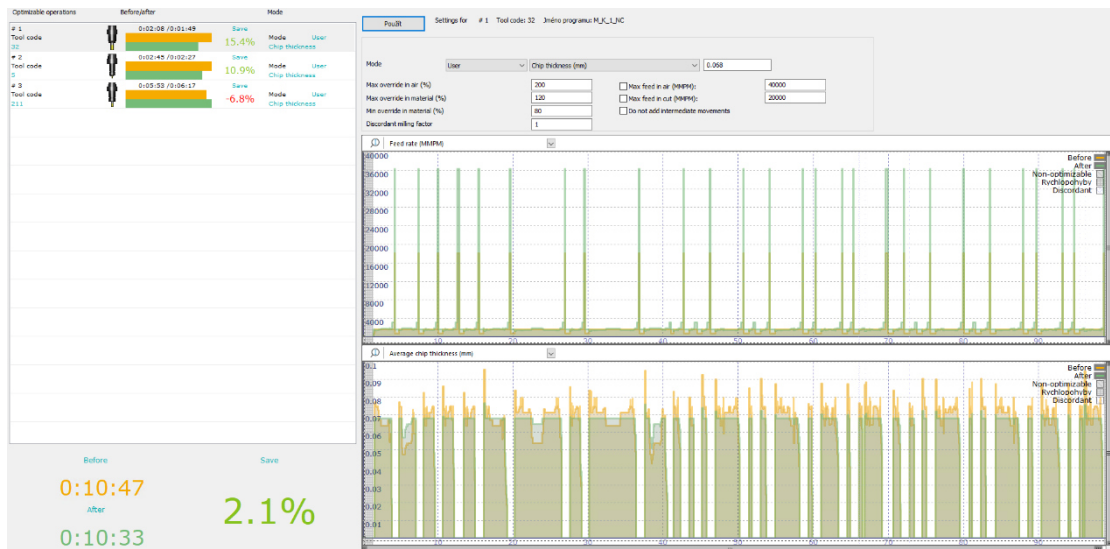
Na detailnějším Obr. 37 pro hrubování je patrné, zvláště na spodním grafu, jak se Eureka for Chronos snaží dosáhnout k hranici vypočítaného objemového faktoru. Spodní část obrázku znázorňuje neoptimalizovaný NC program, který je zobrazen žlutou čarou a optimalizovaný NC program, který je zelenou barvou.



Obr. 37: Detailní pohled metody objemového faktoru pro hrubování

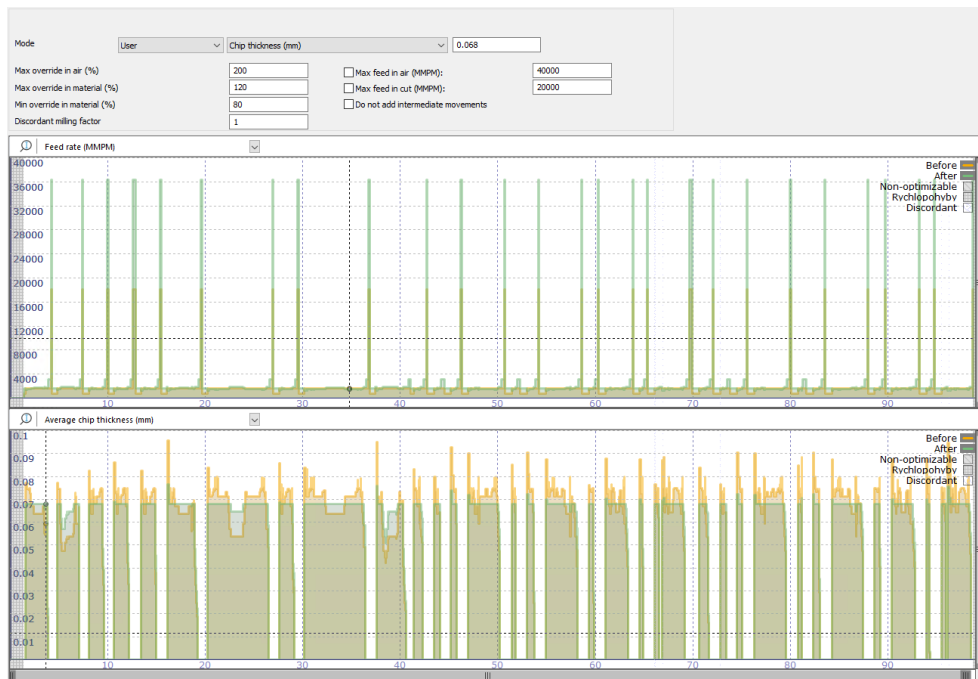
4.3.2 Metoda tloušťky třísky

Opět byly vypočítané hodnoty dosazeny do Eureka for Chronos. Obr. 38 ukazuje kompletní optimalizaci jednotlivých operací. Jmenovitě pro hrubování bylo ušetřeno 15,4 % času a pro zbytkové hrubování byl čas snížen o 10,9 %. U poslední operace se naopak čas zvýšil a to o 6,8 %. To může být zapříčiněno použitím nevhodného výpočtového vztahu pro výpočet střední tloušťky třísky při obrábění kulovou frézou. Celková úspora času dosáhla 2,1 %.



Obr. 38: Metoda tloušťky třísky komplet

Na detailnějším Obr. 39 pro hrubování při použití metody tloušťky třísky je vidět, jak se Eureka for Chronos snaží přiblížit k vypočítané hodnotě.



Obr. 39: Detailní pohled metody tloušťky třísky pro hrubování

5 Provedení experimentu

V této kapitole bude popsán průběh experimentu, který zkoumal optimalizovaný program a vliv nastavení funkcí Sinumeriku na posuvovou rychlost.

Nejprve byl připravený program ze softwaru Eureka for Chronos exportován do formátu, který je řídicí systém schopný číst, a to do ISO kódu. Následně byl optimalizovaný program dle metody tloušťky třísky přenesen na externím médiu do stroje. Před spuštěním jednotlivých pokusů experimentů byla na stroji zapnuta a nastavena funkce SL Trace. SL Trace poskytuje funkci záznamu zvolených parametrů, která sbírá a následně graficky zobrazuje obecná NC data (osy, pohon atd.) nebo PLC data. Funkce tedy slouží k záznamu časové změny dat. Funkce může sloužit jako analýza výkonu stroje, obráběcího procesu nebo k odstranění závad. SL Trace lze zapnout a vypnout v libovolném řádku programu pomocí takzvaného triggeru. Lze nastavit i parametry měření, jako interval měření, délka měření a již zmíněný trigger. Veškerá data mohou být uložena ve formátu csv a dále lze s nimi pracovat mimo NC stroj nebo přímo ve stroji, kde lze výsledné hodnoty zobrazit v přehledném grafu. [15, 16]

Proměnná	Komentář	Barva	Pero	Zobr.
MachineAxis/measPos1[u1, 1]	Actual value of position, encoder 1	█	—	<input checked="" type="checkbox"/>
MachineAxis/measPos1[u1, 2]	Actual value of position, encoder 1	█	—	<input checked="" type="checkbox"/>
MachineAxis/measPos1[u1, 3]	Actual value of position, encoder 1	█	—	<input checked="" type="checkbox"/>

Detaily
 Proměnná: /Channel/MachineAxis/measPos1[u1, 1]
 Komentář: Actual value of position, encoder 1
 Událost: Interpolační cyklus (cyklus IPO)
 Kanál: CHAN1
 Axis: XM1

Obr. 40: Ukázka nastavení SL Trace v řídicím systému Sinumerik

V tomto experimentu byl SL Trace nastaven pro osy X, Y a Z stejným způsobem. Trigger byl vždy na stejné pozice na začátku a na konci programu. Časový interval byl nastaven na 0,02 sekundy a sběr signálu byl nastaven pro „Actual value of position, encoder 1“.

Z kvalifikační práce na téma „Nástroje systému Sinumerik pro řízení posuvové rychlosti a jejich praktické využití“ bylo výsledkem, že největší úspory času dosahovala funkce FLIN a to až 30 %. Dále pak funkce FCUB, která snižovala dobu trvání programu o přibližně 22 %. Čas od funkce FNORM se bral jako etalon.

5.1 Hrubování bez cyklu 832

Jako první byl spuštěn optimalizovaný program bez cyklu 832. Jak bylo očekáváno na základě předcházející kvalifikační práce, kde byl zkoumán vliv použití systému Sinumerik pro posuvovou rychlost FNORM, FLIN a FCUB, stroj vykazoval trhavé pohyby. Trhavé pohyby byly způsobeny nedostatečně plynulou návazností jednotlivých NC bloků. Po uplynutí experimentu byla data ze stroje nahrána na externí přenosné uložení. S daty bude dále pracováno při vyhodnocení experimentu. V příložené tabulce je uvedena doba trvání experimentu, který byl získán z řídicího panelu.

Tab. 7: Tabulka doby trvání hrubování bez cyklu 832

	Čas stroje [min:s]
Hrubování bez cyklu 832	5:02

5.2 Hrubování s cyklem 832 a bez funkce Sinumeriku pro posuvovou rychlost

Jako druhý byl spuštěn optimalizovaný program s cyklem 832, ale bez použití nástrojů systému Sinumerik pro posuvovou rychlost (FNORM, FLIN a FCUB). Cyklus 832 byl nastaven pro hrubování s tolerancí 0,1 mm. Dle předpokladů stroj konal plynulé pohyby bez viditelných trhavých pohybů, a to z důvodu, že cyklus 832 v sobě obsahuje modální funkci G645 a kompresor NC bloků COMPCAD. Obě tyto funkce se obecně snaží o dosažení maximální kontinuity pohyby po dráze mezi jednotlivými NC bloky. Po dokončení experimentu byla data ze stroje nahrána na externí přenosné uložení. Dále v diplomové práci bude označovat „bez funkce Sinumeriku pro posuvovou rychlost“ jako „bez F“.

Tab. 8: Tabulka doby trvání hrubování s cyklem 832 a bez F

	Čas stroje [min:s]
Hrubování s cyklem 832 a bez funkce Sinumeriku pro posuvovou rychlost F	1:52

5.3 Hrubování s FNORM

Další byl spuštěn optimalizovaný program s cyklem 832 a funkcí Sinumeriku pro posuvovou rychlost FNORM. Stroj konal plynulé pohyby bez viditelných trhavých pohybů. Po konci experimentu byla data ze stroje nahrána na externí přenosné uložení.

Tab. 9: Tabulka doby trvání hrubování s FNORM

	Čas stroje [min:s]
Hrubování s FNORM	1:52

5.4 Hrubování s FLIN

Předposlední optimalizovaný program byl spuštěn s cyklem 832 a funkcí Sinumeriku pro posuvovou rychlost FLIN. Podle předpokladů z práce předchozích let, by měla tato funkce dosahovat nejvyššího snížení času ze všech pokusů.

Tab. 10: Tabulka doby trvání hrubování s FLIN

	Čas stroje [min:s]
Hrubování s FLIN	1:51

5.5 Hrubování s FCUB

Poslední optimalizovaný program byl spuštěn s cyklem 832 a funkcí Sinumeriku pro posuvovou rychlost FCUB. Tato funkce Sinumeriku pro posuvovou rychlost by měla dle výsledků z kvalifikační práce z předchozích let dosahovat rychlejšího času než program s FNORM a program bez F. Naopak by neměla být rychlejší než program s funkcí FLIN.

Tab. 11: Tabulka doby trvání hrubování s FCUB

	Čas stroje [min:s]
Hrubování s FCUB	1:51

6 Vyhodnocení experimentu

V této části diplomové práce bude vyhodnocen průběh experimentu, který zkoumal optimalizovaný program s vlivem jednotlivých nastavení funkcí Sinumeriku na posuvovou rychlost. U jednotlivých nastavení funkcí Sinumeriku pro posuvovou rychlost bude vypočítána a následně porovnána celková ujetá dráha, průměrná posuvová rychlost a čas doby trvání programu.

6.1 Postup výpočtů u vyhodnocení experimentu

Jak už bylo uvedeno, data byla ze stroje exportována ve formátu csv. Následně byl proveden převod do formátu xls. Byly získány hodnoty os X [mm], Y [mm], Z [mm] a času v sekundách. Na Obr. 41 je ukázka prvních deseti hodnot získaných ze stroje pro hrubování bez cyklu 832.

čas	osa X	osa Y	osa Z
0	-51,55837	12,56947	439,021
0,02	-51,55836	12,56947	439,021
0,04	-51,55725	12,56866	439,021
0,06	-51,45073	12,44936	439,021
0,08	-50,66664	11,55415	439,021
0,1	-48,53966	9,1099	439,02
0,12	-44,72892	4,7362	439,02
0,14	-39,7496	-0,98102	439,02
0,16	-34,27265	-7,27012	439,021

Obr. 41: Ukázka deseti hodnot získaných ze stroje pro hrubování bez cyklu 832

Pro zjištění celkové ujeté dráhy a průměrné posuvové rychlosti nejdříve byla vypočítána ujetá vzdálenost v jednotlivých osách X, Y a Z. Ukázka výpočtu byla provedena pro osu X. Analogicky byl výpočet aplikován u os Y a Z.

$$X_n = x_2 - x_1 [\text{mm}] \quad (6.1)$$

kde:

X_n – ujetá vzdálenost v ose X za určitý časový interval

x_2 – souřadnice v ose X druhého bodu

x_1 – souřadnice v ose X prvního bodu

Dále bylo třeba vypočítat ujetou dráhu ve všech osách dohromady za jednotlivé časové intervaly. Byl použit vztah (6.2).

$$L_{xyz_n} = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2 + Z_n^2} [\text{mm}] \quad (6.2)$$

kde:

L_{xyz_n} – celková ujetá vzdálenost v osách X, Y a Z za určitý časový interval

X_n - ujetá vzdálenost v ose X za určitý časový interval

Y_n - ujetá vzdálenost v ose Y za určitý časový interval

Z_n - ujetá vzdálenost v ose Z za určitý časový interval

Následně bylo možné vypočítat celkovou ujetou vzdálenost v závislosti na všech osách.

$$L_{xyz} = \sum L_{xyz_n} \quad (6.3)$$

kde:

L_{xyz_n} – celková ujetá vzdálenost v osách X, Y a Z za určitý časový interval

L_{xyz} – celková ujetá vzdálenost v závislosti na všech osách

Jako poslední bylo potřeba zjistit průměrnou posuvovou rychlost v_f . K tomu byl využit vzorec (6.4).

$$v_f = \frac{L_{xyz}}{T} \cdot 60 \text{ [mm/min]} \quad (6.4)$$

kde:

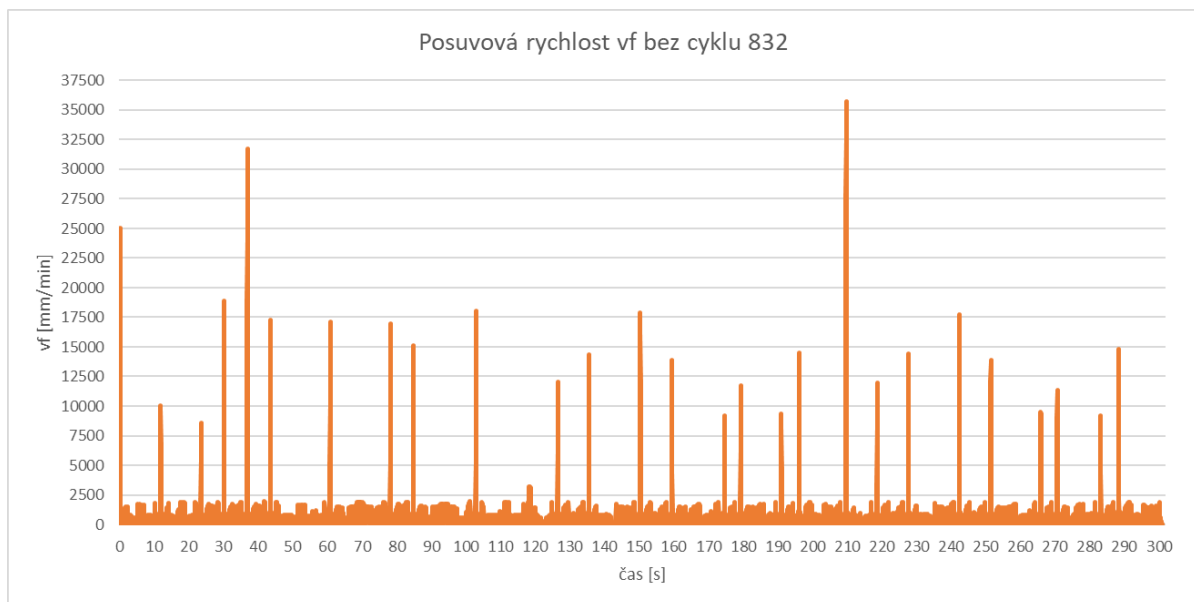
L_{xyz} – celková ujetá vzdálenost v závislosti na všech osách

T – doba trvání programu [s]

Všechny tyto výpočty byly analogicky aplikovány u všech programů.

6.2 Hrubování bez cyklu 832

Na Obr. 42 lze vidět vypočítaný průběh posuvové rychlosti v čase ve všech třech osách současně. Největší dosažitelná hodnota posuvové rychlosti (G0) byla přibližně 35 500 mm/min.



Obr. 42: Graf posuvové rychlosti bez cyklu 832

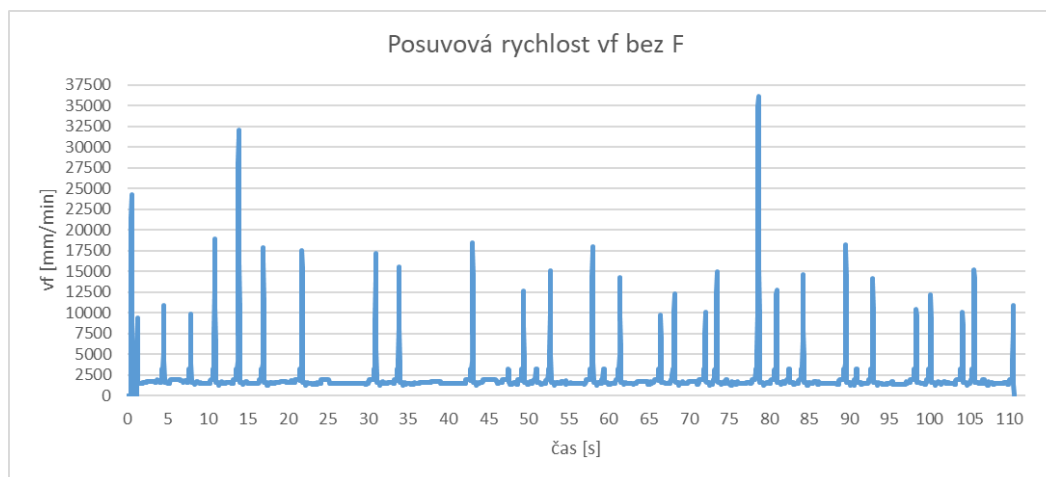
V příložené tabulce jsou uvedeny vypočítané údaje dle hodnot získaných ze stroje. Je zde uvedena celková ujetá dráha ve všech třech osách dohromady podle vztahu (6.3). Dále průměrná posuvová rychlost, kterou byl schopen dosahovat program a jako poslední čas trvání programu. Čas trvání programu je přesnější než uvedený v předchozí kapitole, a to z důvodu, že řídicí systém zaokrouhluje hodnotu času uvedenou na řídicím panelu. Čas, jak bylo předpokladem, byl mnohem delší než u zbylých programů.

Tab. 12: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování bez cyklu 832

Celková ujetá dráha [mm]	Průměrná posuvová rychlost [mm/min]	čas [s]
3361,7	670,3	300,92

6.3 Hrubování s cyklem 832 a bez funkce Sinumeriku pro posuvovou rychlost

Z Obr. 43 je patrný průběh vypočítané posuvové rychlosti v závislosti na čase ve všech třech osách souvisle. Největší dosažitelná hodnota posuvové rychlosti byla přibližně 36 000 mm/min. U maximální dosažené hodnoty posuvové rychlosti je důležité si uvědomit, že se jedná o rychlost rychloposuvem (G0). Nejedná se o naprogramovanou dráhu v materiálu (G1). Stroj se snaží dosáhnout při rychlosti rychloposuvem (G0) maximální hodnoty, v tomto případě je to 60 000 mm/min, ale té stroj na krátkých úsecích není schopen dosáhnout. Průměrná dosažitelná posuvová rychlost byla větší než u programu bez cyklu 832.



Obr. 43: Graf posuvové rychlosti s cyklem 832 a bez funkce F

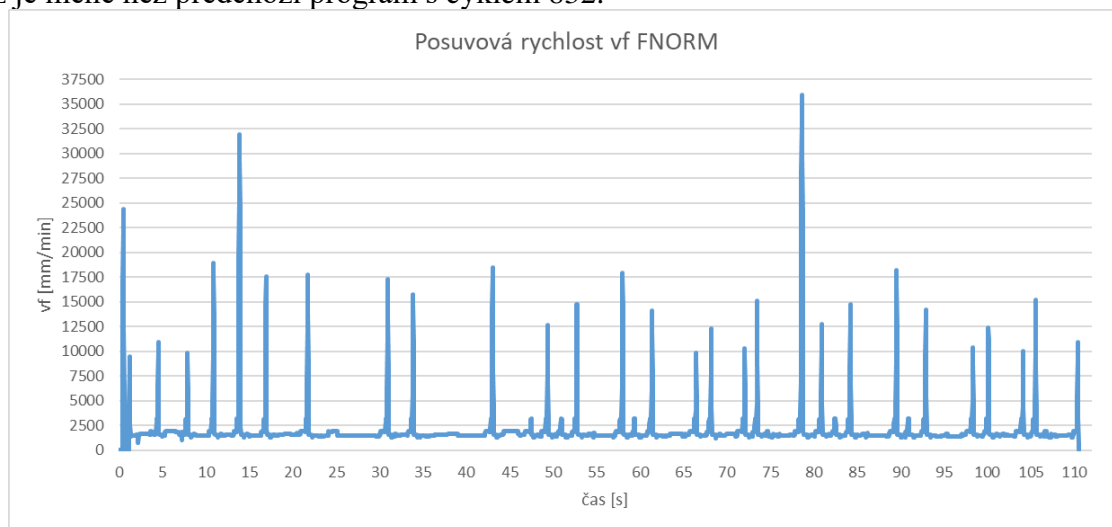
Opět v příložené tabulce jsou uvedené vypočítané a získané hodnoty ze stroje. Je zde uvedena celková ujetá dráha ve všech třech osách dohromady. Také je uvedena průměrná posuvová rychlost a jako poslední čas doby trvání programu.

Tab. 13: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování s cyklem 832 a bez F

Celková ujetá dráha [mm]	Průměrná posuvová rychlost [mm/min]	čas [s]
3782,4	2052,7	110,56

6.4 Hrubování s FNORM

Na Obr. 44 lze vidět průběh posuvové rychlosti v závislosti na čase ve všech třech osách souvisle. Největší dosažitelná hodnota posuvové rychlosti (G0) byla přibližně 35 500 mm/min, což je méně než předchozí program s cyklem 832.



Obr. 44: Graf posuvové rychlosti s FNORM

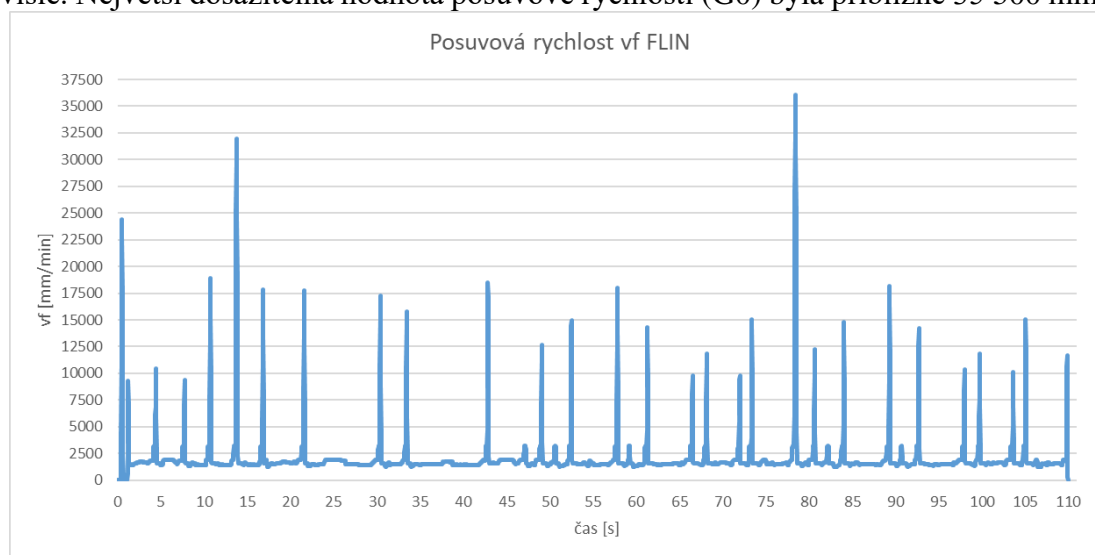
Opět v příložené tabulce jsou uvedeny vypočítané a získané hodnoty ze stroje. Je zde uvedena celková ujetá dráha. Dále průměrná posuvová rychlost a jako poslední čas trvání programu.

Tab. 14: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování s FNORM

Celková ujetá dráha [mm]	Průměrná posuvová rychlost [mm/min]	čas [s]
3781,9	2052,8	110,54

6.5 Hrubování s FLIN

Obr. 45 popisuje průběh posuvové rychlosti v závislosti na čase ve všech třech osách souvisle. Největší dosažitelná hodnota posuvové rychlosti (G0) byla přibližně 35 500 mm/min.



Obr. 45: Graf posuvové rychlosti s FLIN

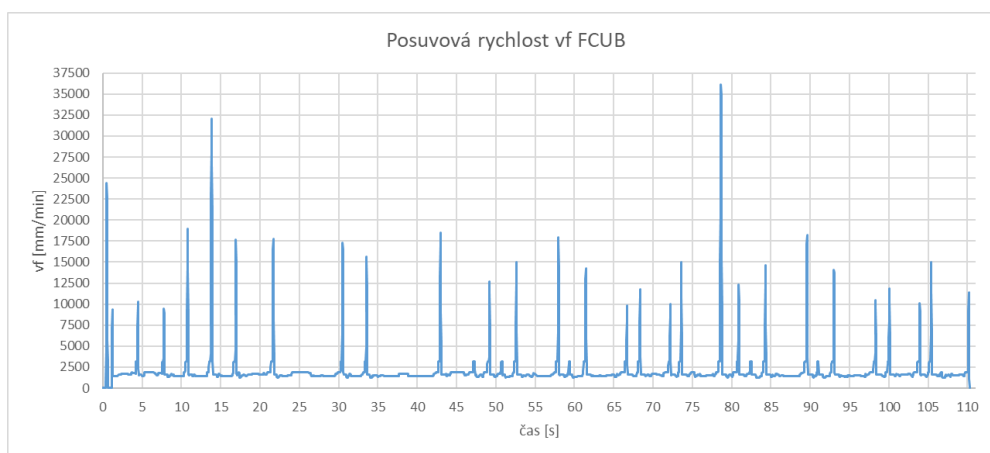
Opět jsou v příložené tabulce uvedeny vypočítané a získané hodnoty ze stroje. Nejprve tabulka obsahuje hodnotu celkové dráhy, pak průměrnou posuvovou rychlost a jako poslední čas doby trvání programu.

Tab. 15: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování s FLIN

Celková ujetá dráha [mm]	Průměrná posuvová rychlost [mm/min]	čas [s]
3781,9	2063,2	109,98

6.6 Hrubování s FCUB

Z Obr. 46 lze vyčíst průběh posuvové rychlosti v závislosti na čase. Největší dosažitelná hodnota posuvové rychlosti (G0) byla přibližně 35 500 mm/min.



Obr. 46: Graf posuvové rychlosti s FCUB

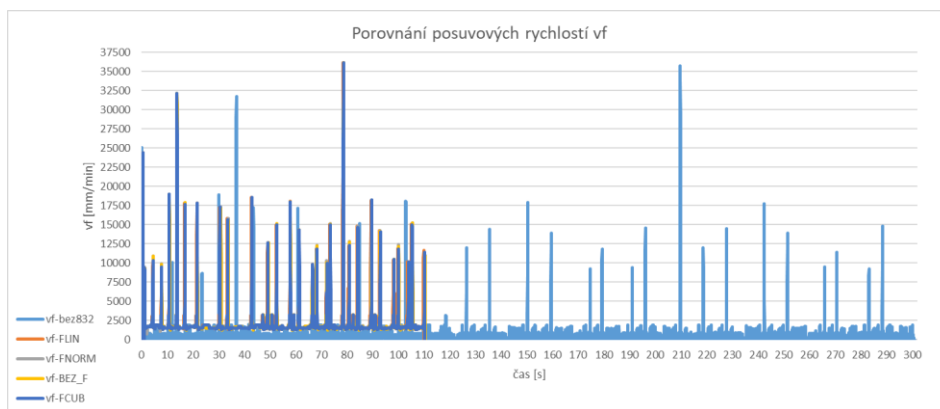
Opět jsou v příložené tabulce uvedeny vypočítané a získané hodnoty ze stroje. Je zde uvedena celková ujetá dráha ve všech třech osách dohromady. Dále průměrná posuvová rychlost a jako poslední čas trvání programu.

Tab. 16: Tabulka vypočítaných hodnot pro hrubování s FCUB

Celková ujetá dráha [mm]	Průměrná posuvová rychlost [mm/min]	čas [s]
3782,1	2057,7	110,28

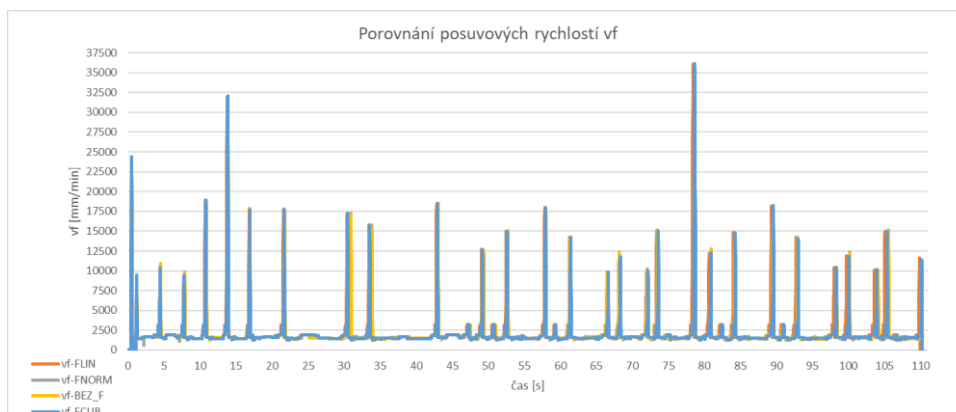
6.7 Porovnání hodnot

V tomto bodě budou porovnány výsledky zjištěných a vypočítaných hodnot z experimentu. Na Obr. 47 je uvedený především časový rozdíl mezi programem bez cyklu 832 a programy s cyklem 832. Kde program bez cyklu 832 dosahoval výrazně delšího času než programy s cyklem 832. Jak už bylo zmíněno v teoretické části, bez cyklu 832 se v praxi nedoporučuje obrábět. Tudíž z toho důvodu, je relevantnější porovnat programy pouze ty, které obsahují cyklus 832.



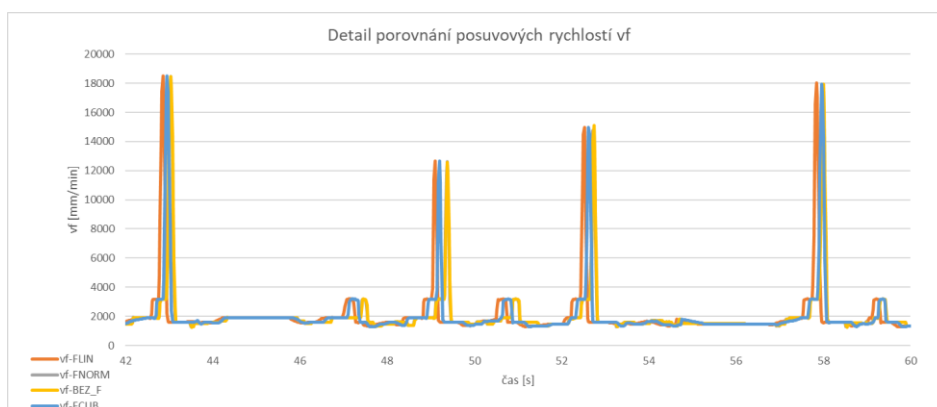
Obr. 47: Porovnání posuvových rychlostí všech měření

Po odstranění programu bez cyklu 832 si lze na Obr. 48 všimnout, že křivky u jednotlivých posuvových rychlostí jsou takřka identické. Dosahují přibližně stejné hodnoty posuvové rychlosti a časově jsou taky velmi podobné.



Obr. 48: Porovnání posuvových rychlostí s cyklem 832

Pro přesnější pohled na křivky posuvových rychlostí, byl vytvořen Obr. 49, kde je předchozí graf v detailu. Detail byl volen v rozmezí 42 až 60 sekund, a to z důvodu, že na krátkém úseku byl značný počet změn hodnot posuvové rychlosti. I detailní obrázek potvrdil, že křivky posuvových rychlostí jsou velmi identické a liší se v zanedbatelné míře.



Obr. 49: Detail porovnání posuvových rychlostí s cyklem 832

Tab. 17 porovnává číselné hodnoty celkové ujeté dráhy, průměrné posuvové rychlosti a čas pro jednotlivé programy. Program bez cyklu 832 dosahoval jednoznačně nejdelšího času a nejmenší hodnoty průměrné posuvové rychlosti. Za zmínku stojí, že celková ujetá dráha byla přibližně o 400 mm kratší než zbylé programy. Dráhy by měly být teoreticky shodné, je tedy potřeba tento jev dále prozkoumat. Proto byl navržen další experiment, který tento jev dále prozkoumá.

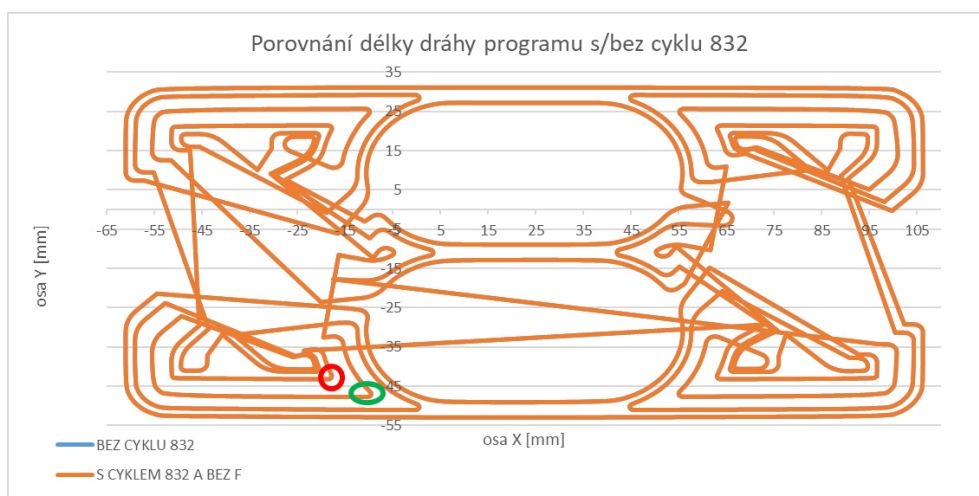
Největší průměrnou posuvovou rychlost dosahoval program s funkcí FLIN s korespondujícím nejkratším časem. Jako druhý byl program s FCUB a poté byly programy s FNORM a bez funkce pro posuvovou rychlost. Umístění jednotlivých funkcí pro posuvovou rychlost je totožné jako v kvalifikační práci, na kterou tato diplomová práce navazuje. Rozdíl časů je naprosto zanedbatelný, a to i v případě, když se pracuje z přesnějšími časy odečtenými ze stroje.

Odchylka celkové ujeté dráhy u hrubování s cyklem 832 je rovněž bezvýznamná. Důsledkem je to, že dráha je ovlivněna cyklem 832, který v sobě má automaticky aktivované funkce G64, G641, G642, G643, G644 nebo G645, kompresor NC bloků COMPCAD. Při experimentu bylo po zapnutí stroje vyzorováno, že při spuštění cyklu 832 je automaticky spouštěna funkce G645 a kompresor NC bloků COMPCAD. K tomu byly pak dále připsány nástroje pro posuvovou rychlost, které mohou také ovlivnit délku dráhy.

Tab. 17: Tabulka celkového porovnání programů

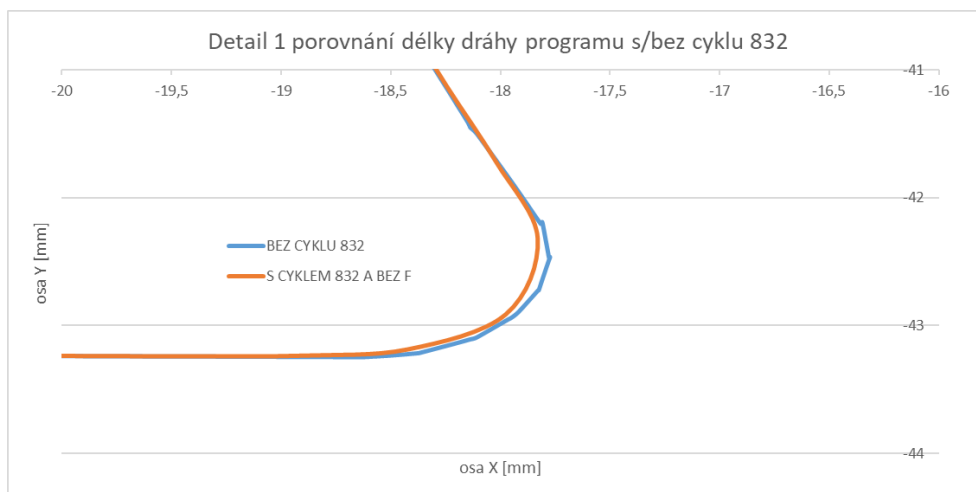
Tabulka porovnání			
	Celková ujetá dráha [mm]	Celková vf [mm/min]	Čas [s]
BEZ_832	3361,7	670,3	300,92
BEZ_F	3782,4	2052,7	110,56
FNORM	3781,9	2052,8	110,54
FLIN	3781,9	2063,2	109,98
FCUB	3782,1	2057,7	110,28

Nejprve je však třeba porovnat, jak cyklus 832 ovlivnil délku dráhy na již provedeném experimentu. Na Obr. 50 je ukázka porovnání programu bez cyklu 832, který je dle výpočtů zhruba o 400 mm delší než programy s cyklem 832. V maximálním měřítku se dráhy naprosto překrývají a není patrný žádný rozdíl. Proto byly vytvořeny detaily zeleně a červeně zvýrazněných oblastí.



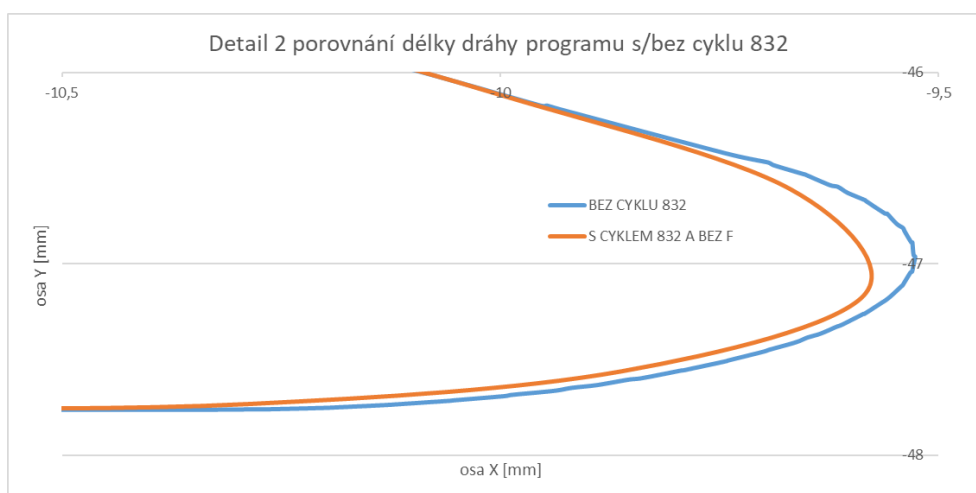
Obr. 50: Porovnání délky dráhy programu bez cyklu 832 a programem s cyklem 832 a bez F

Na detailním Obr. 51 je zřetelně viditelné, u programu bez cyklu 832, rozdělení kruhové dráhy na jednotlivé interpolace. I přes vypnutý cyklus 832 byla aktivována funkce G64, respektive G645, ta se jevila jako nejslabší funkce pro určitou plynulost. Trhavé pohyby stroje mohou být výsledkem více faktorů, například zmíněné viditelné kruhové interpolace (viz Obr. 51 a Obr. 52), přechody mezi jednotlivými NC bloky (G1) nebo pro stroj obtížně dosažitelná skoková změna posuvové rychlosti. U Programu s cyklem 832 interpolátor spíše zmenšil délku jednotlivých interpolačních úsečků. Cyklus 832 se snažil o dosažení plynulého navazování NC bloků. To mělo za následek, že například při výrazné změně směru dráhy (jak lze vidět na Obr. 51 a i na Obr. 52) byla původní dráha hodnot X a Y proložena plynulejší křivkou. Proložení plynulejší křivkou způsobilo v celkové míře nárůst v ujeté vzdálenosti.



Obr. 51: Detail 1 porovnání délky dráhy programu bez cyklu 832 a programem s cyklem 832 a bez F

Obr. 52 opět ukazuje téměř to stejné, co předchozí obrázek, s jediným rozdílem, a to, že porovnání jednotlivých drah interpolace je ukázáno na jiném tvaru. Lze zde opět vidět rozdělení dráhy na jednotlivé úsečky interpolací u programu bez cyklu 832. Program s cyklem 832, jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách této diplomové práce, v sobě obsahuje funkce pro dosažení plynulé návaznosti NC bloků. Tyto funkce, jmenovitě kompresor NC bloků a G645, mají vliv na „vyhlazení“ dráhy. V nadcházejícím doplňkovém experimentu, bude zkoumán vliv zmíněného kompresoru NC bloků na vliv celkové ujeté dráhy.



Obr. 52: Detail 2 porovnání délky dráhy programu bez cyklu 832 a programem s cyklem 832 a bez F

Zbytkové hrubování nebylo provedeno, a to z důvodu, že se jedná o typově obdobnou operaci jako samotné hrubování, přičemž výsledek hrubování nepotvrdil hypotézu kvalifikační práce z předchozích let o snížení času vlivem FNORM, FLIN a FCUB. Dokončení nebylo uskutečněno a to proto, že Eureka for Chronos vykazovala menší úspory času na dané operaci oproti úsporám při hrubování. Tudiž bylo přihlédnuto jak u dokončení a zbytkovém hrubování k časovému a ekonomickému důvodu programy neuskutečnit, protože nelze předpokládat zásadně jiná zjištění, než je tomu u provedených experimentů.

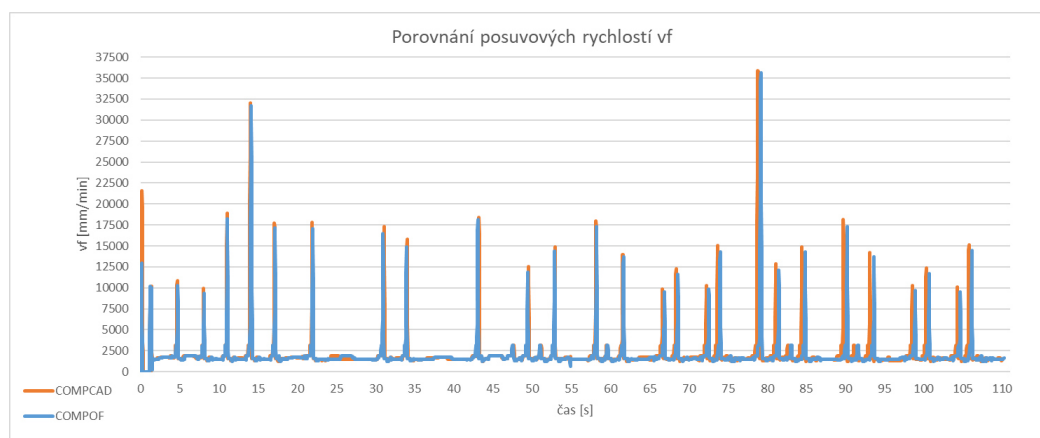
6.8 Kontrola dráhy

V této části bude popsán a vyhodnocen experiment, který zkoumal příčinu rozdílu dráhy v programu bez cyklu 832 a s cyklem 832. Cyklus 832 v sobě kromě jiných funkcí obsahuje funkci kompresoru NC bloků. Tato funkce obecně aproximuje konturu zadanou lineárními bloky do polynomických bloků. COMPCAD významně zkracuje strojní čas a paměť prostoru, která se optimalizuje z hlediska posuvové rychlosti a jakosti povrchu. Detailnější popis kompresoru je uveden v kapitole 3.2.1.3. [4, 5]

Pro doplňující experiment byl použit stejný optimalizovaný program jako pro hrubování. V první řadě byl puštěn program s cyklem 832 a aktivovaným kompresorem COMPCAD. Poté byl puštěn ten stejný program pouze s rozdílem, že byl vypnut kompresor COMPOF. Konfigurace cyklu 832 byla zvolena pro hrubování s tolerancí 0,1 mm.

6.8.1 Porovnání COMPCAD a COMPOF

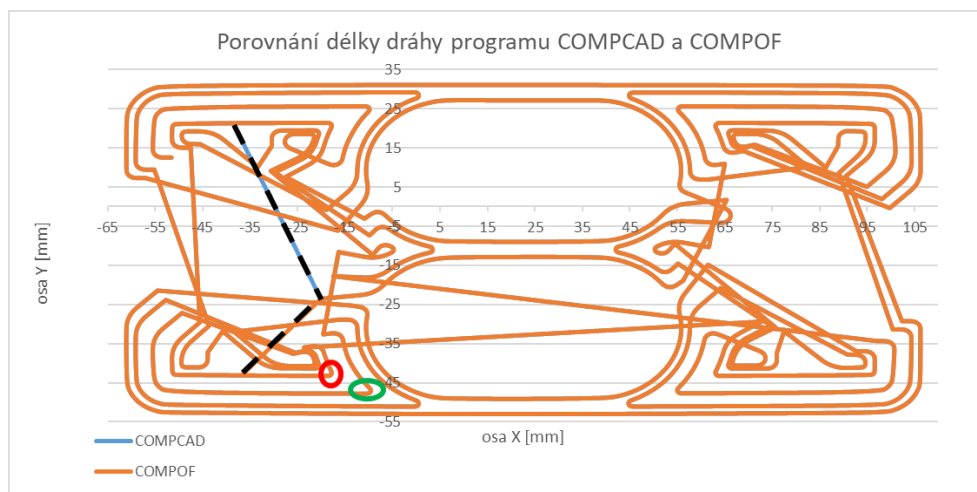
Na Obr. 53 lze vidět, že program s aktivovaným kompresorem dosahoval větší posuvové rychlosti než program s deaktivovaným kompresorem. Největší hodnota posuvové rychlosti bylo dosaženo kolem 78. sekundy programu a dosahovala hodnot kolem 35 200 mm/min. U maximální dosažené hodnoty posuvové rychlosti je důležité si uvědomit, že se jedná o rychlost rychloposuvem (G0). Nejedná se o naprogramovanou dráhu v materiálu (G1). Stroj se snaží dosáhnout při rychlosti rychloposuvem (G0) maximální hodnoty, v tomto případě je to 60 000 mm/min, ale té stroj na krátkých úsecích není schopen dosáhnout.



Obr. 53: Porovnání programu COMPCAD a COMPOF

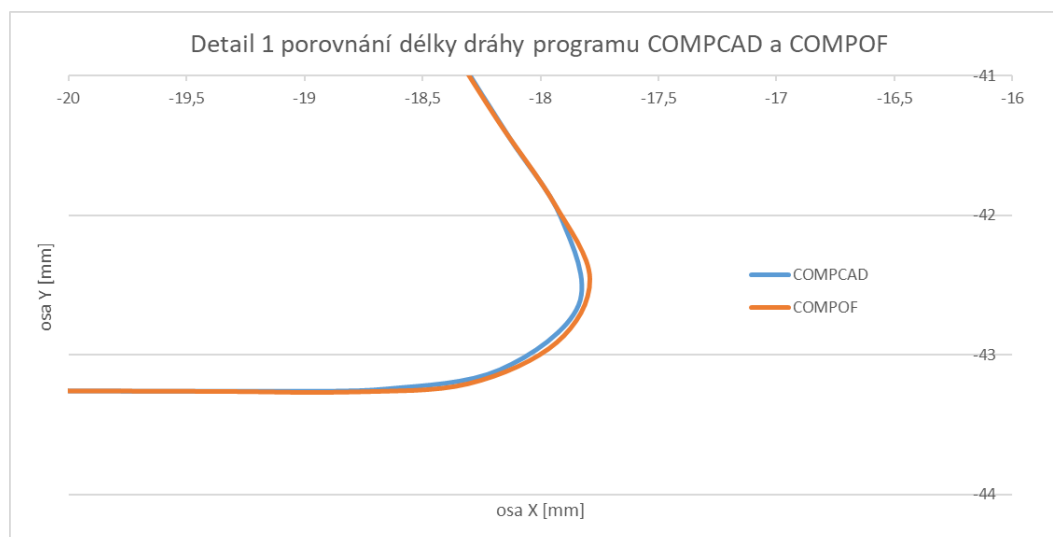
Obr. 54 znázorňuje porovnání délky dráhy s aktivovaným a vypnutým kompresorem NC bloků. Po důkladném prozkoumání drah COMPCAD a COMPOF byl nalezen rozdíl v drahách. Rozdílná místa jsou vyznačena čerchovanou černou čarou. Tyto rozdíly v drahách byly identifikovány jako přejezdy či nájezdy rychloposuvu. Algoritmus při jednotlivých nastavení se chová při výpočtech odlišně, a tak mohl „vidět“ malý zbytek materiálu k obrobení pokaždé v jiné oblasti. Na obrázku jsou vyznačena stejná místa detailního pohledu (červené a

zelené označení) jako na předchozím porovnání programu s a bez cyklu 832. Detailní pohledy budou opět popsány a vyhodnoceny v následujícím odstavci.



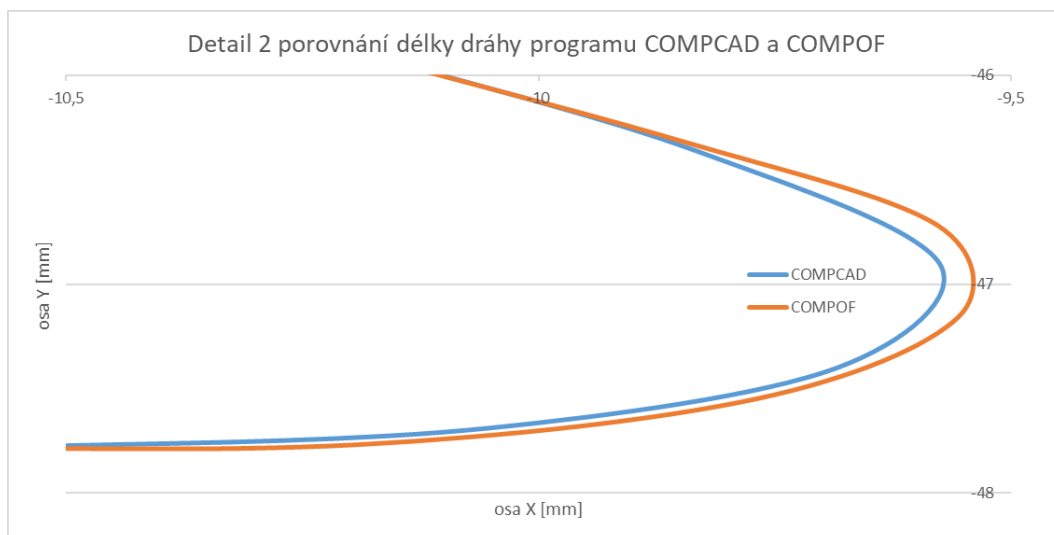
Obr. 54: Porovnání délky dráhy programu s COMPCAD a COMPOF

Obr. 55 ukazuje první detail červeně zvýrazněné oblasti z Obr. 54. Z detailu lze vyčíst, že s aktivovaným kompresorem NC bloků COMCAD dráha dosahovala výrazně hladšího průběhu. U dráhy s vypnutým kompresorem COMPOF je patrné, že dráha není tak hladká jako s aktivovaným kompresorem. Jak už bylo psáno dříve, tak cyklus 832 v sobě obsahuje více funkcí, které mají vliv na kontinuálnost návaznosti NC bloků. Po vypnutí kompresoru COMPOF zůstala aktivovaná funkce G645, která zajistila hladší průběh plynulosti mezi jednotlivými NC bloky.



Obr. 55: Detail 1 porovnání délky dráhy programu s COMCAD a COMPOF

Obr. 56 ukazuje druhý detail zeleně zvýrazněné oblasti z Obr. 54. Při puštění programu na stroji nebyl pozorován žádný rozdíl v programech, až při zpracování dat byl rozdíl patrný. Jak už bylo popsáno u předchozího obrázku, tak lze zahlédnout, že s aktivovaným kompresorem NC bloků COMPCAD dosahovala dráha křivky hladšího průběhu. Po vypnutí kompresoru NC bloků COMPOF převzala funkci vyhlazení funkce G645.



Obr. 56: Detail 2 porovnání délky dráhy programu s COMCAD a COMPOF

Příložená tabulka porovnává číselné hodnoty celkové ujeté dráhy, průměrné posuvové rychlosti a čas doby trvání programu. Program se zapnutým kompresorem COMPCAD dosahoval delší celkové ujeté dráhy, to je připisováno rozdílu, který je vyznačen a popsán na Obr. 54 čerchovanou černou čarou. Dále je rozdíl hodnot připisován zkrácení nebo prodloužení vlivem různého zaoblení drah. Z definice kompresoru, který obecně slouží ke spojitému napojení mezi NC bloky, zvýšení maximální dosažitelné posuvové rychlosti a zmenšení počtu bloků k naprogramování kontury, bylo potvrzeno, že opravdu program s aktivovaným kompresorem COMPCAD, dosahoval větší průměrné posuvové rychlosti, a tudíž i kratšího času než program s vypnutým kompresorem COMPOF. Navíc bylo dále potvrzeno, že aktivovaný kompresor COMPCAD snížil počet hodnot získaných ze stroje. Pro program se zapnutým kompresorem COMPCAD byl 5538 a pro program s vypnutým kompresorem COMPOF byl 5557. To je rozdíl 19 hodnot.

Tab. 18: Tabulka porovnání COMPCAD a COMPOF

Tabulka porovnání			
	Celková ujetá dráha [mm]	Průměrná posuvová rychlost [mm/min]	Čas [s]
COMPCAD	3798,8	2058,6	110,72
COMPOF	3783,2	2043,1	111,10

6.9 Porovnání celkové ujeté vzdálenosti

Při porovnání všech hodnot celkové ujeté dráhy bylo vypočteno, že program s aktivovaným kompresorem COMPCAD dosahoval nejdelší celkové ujeté dráhy. Program s vypnutým kompresorem COMPOF dosahoval takřka identické ujeté dráhy jako zbylé programy s cyklem 832 a funkcemi pro nastavení posuvové rychlosti FNORM, FLIN a FCUB. Odchylky celkové ujeté dráhy u programů s cyklem 832 jsou nevýznamné. Příčina je přikládána tomu, že dráha je ovlivněna v první řadě cyklem 832, který v sobě má libovolně automaticky aktivované funkce kompresor NC bloků COMPCAD a G64, respektive při tomto experimentu byla aktivována funkce G645. V druhé řadě vstupují funkce pro řízení posuvové rychlosti FNORM, FLIN a FCUB. Tudíž na celkovou ujetou dráhu či posuvovou rychlost má vliv hned několik parametrů. Výjimkou je program bez cyklu 832, který měl nejkratší dráhu, a to zhruba o 400 mm. Tento jev byl přisouzen tomu, že program bez přidaného cyklu 832 dodržuje naprogramované hodnoty dráhy a neprokládá je vyhlazenou křivkou. Zmíněné proložení naprogramované dráhy vyhlazenou křivkou způsobilo, že v některých místech řídicí systém zkrátil dráhu, ale v souhrnu ji prodloužil.

Tab. 19: Tabulka celkového porovnání ujeté vzdálenosti

Tabulka porovnání			
	Celková ujetá dráha [mm]	Celková vf [mm/min]	Čas [s]
BEZ_832	3361,7	670,3	300,92
BEZ_F	3782,4	2052,7	110,56
FNORM	3781,9	2052,8	110,54
FLIN	3781,9	2063,2	109,98
FCUB	3782,1	2057,7	110,28
COMPCAD	3798,8	2058,6	110,72
COMPOF	3783,2	2043,1	111,10

7 Technické zhodnocení

Podle předpokladů práce „Nástroje systému Sinumerik pro posuvovou rychlost a jejich praktické využití“ bylo zjištěno, že funkce pro posuvovou rychlost FNORM, FLIN a FCUB mají významný vliv na dosahování předepsané posuvové rychlosti a tím pádem i na snížení času obrábění. Závěr ze zmíněné práce vycházel z velmi teoretického experimentu, kde posuvové rychlosti měly velké předepsané rozdíly hodnot na velmi malé lineární dráze. To zapříčinilo u funkce FLIN a FCUB snížení času až v desítkách procent oproti FNORM.

Experiment této diplomové práce ukázal, že při reálném obrábění, kde nejsou tak výrazné skoky posuvových rychlostí, mají rozdíly mezi funkcemi FNORM, FLIN a FCUB zanedbatelný vliv. Dále bylo zjištěno, že na posuvovou rychlost a na celé obrábění má vliv souhrn parametrů. Především cyklus 832, který obsahuje funkci G645 a kompresor NC bloků, a dále pak zmíněné funkce pro řízení posuvové rychlosti FNORM, FLIN a FCUB.

Dalším možným posunem by bylo sledování dynamiky vibrací při použití jednotlivých funkcí Sinumeriku pro posuvovou rychlost. Dále by bylo přínosné sledovat rozdíl ve vibracích a jakosti povrchu u zmíněných funkcí při obrábění vnitřního radiusu frézou. Zkoumání tohoto vlivu bylo ale nad rámec této diplomové práce.

8 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zkoumat a ověřit vliv použití nástrojů systému Sinumerik pro posuvovou rychlost FNORM, FLIN a FCUB na reálné součásti při reálných podmínkách. Dalším cílem bylo praktické ověření chování optimalizovaného NC programu, který byl optimalizován pomocí softwaru Eureka for Chronos při reálném obrábění tvarově složitého dílce. V neposlední řadě byl zkoumán vliv nastavení CNC stroje cyklu 832, který v sobě obsahuje funkce G645 a kompresor NC bloků.

V teoretické části byl nejprve detailněji popsán obráběcí stroj MCU450V-5X, který byl využit k provedení praktické části diplomové práce v prostorách RTI. Dále byly předány základní znalosti o řídicím systému Sinumerik. Poté následoval precizní popis cyklu 832 s funkcemi G64, G641, G642, G643, G644, G645 a kompresorem NC bloků. Poté byl analyzován software Eureka for Chronos, který sloužil k optimalizaci NC kódu. Jako poslední byly popsány kvalifikační práce, na které tato diplomová práce navazuje.

V praktické části byl navržen experiment. Nejdříve byl vytvořen NC program pomocí softwaru SolidCAM. Dále byly vypočítány hodnoty objemového faktoru a tloušťky, které byly následně použity v rámci optimalizačních metod v softwaru Eureka for Chronos. Poté byly NC programy bez cyklu 832 a s cyklem 832 s přiřazenými funkcemi pro posuvovou rychlost FNORM, FLIN, FCUB spuštěny na stroji MCU 450V-5X. Celý experiment byl proveden bez záběru nástroje do materiálu.

Provedení experimentu ukázalo, že oproti výsledkům kvalifikační práce "Nástroje systému Sinumerik pro posuvovou rychlost a jejich praktické využití", na níž tato diplomová práce navazuje, a která udávala, že funkce pro posuvovou rychlost FNORM, FLIN a FCUB mají významný vliv na dosažení předepsané posuvové rychlosti, a tedy i na snížení doby obrábění, je časová úspora nepatrná. Závěr uvedený v této práci byl odvozen z velmi teoretického experimentu, kde posuvové rychlosti měly velké předepsané rozdíly hodnot na velmi krátké lineární dráze. Tento fakt vedl k redukci doby času u funkce FLIN až o 30 % a u FCUB až o 20 %. Funkce FNORM byla použita jako etalonová hodnota.

Při vyhodnocení dat z nového experimentu bylo zjištěno, že funkce FNORM, FLIN a FCUB mají velmi nízký a v praxi zanedbatelný vliv. Stroj s programy s cyklem 832 a aktivovanými zmíněnými funkcemi či neaktivovanými dosahovaly plynulého pohybu a přibližně identických časů, průměrných posuvových rychlostí a celkové ujeté dráhy. Odchylka celkové ujeté dráhy u hrubování s cyklem 832 byla rovněž bezvýznamná. Důsledek byl připisován cyklu 832, který v sobě má libovolně automaticky aktivované funkce G645 a kompresor NC bloků. Pouze program bez cyklu 832 vykazoval při spuštění trhavé pohyby a tím pádem delší čas obrábění a snížení průměrné posuvové rychlosti. Pozoruhodné bylo, že program bez cyklu 832 dosahoval kratší délky celkové ujeté dráhy o přibližně 400 mm. Dráhy by měly být teoreticky shodné, a proto byl navržen další experiment, který zkoumal tento jev. Rozdíl drah byl připisován již zmíněnému cyklu 832. Pro doplňující experiment byl použit stejný optimalizovaný program jako pro hrubování. V první řadě byl puštěn program s cyklem 832 a aktivovaným kompresorem NC bloků COMPCAD. Poté byl puštěn ten stejný program jenom s tím rozdílem, že byl vypnut kompresor NC bloků COMPOF. Z vyhodnocení byla potvrzena definice funkce kompresoru NC bloků, a to že program s aktivovaným kompresorem COMPCAD byl schopen dosahovat větší průměrné posuvové rychlosti, a tudíž i kratšího času než program s vypnutým kompresorem COMPOF. Navíc bylo dále potvrzeno, že aktivovaný kompresor COMPCAD snížil počet potřebných hodnot pro vyhotovení kontury dráhy.

Následným porovnáním hodnot hlavního a doplňujícího experimentu bylo zjištěno, že program s aktivovaným kompresorem COMPCAD dosahoval nejdelší celkové ujeté dráhy, to bylo připsáno rozdílnému způsobu výpočtu algoritmu při manuálním zapnutí této funkce. Program s vypnutým kompresorem COMPOF dosahoval takřka identické ujeté dráhy jako

zbylé programy s cyklem 832 a funkcemi pro nastavení posuvové rychlosti FNORM, FLIN a FCUB. To bylo z důvodu, že byla stále aktivována funkce G645.

Závěrem práce lze říci, že při reálném obrábění, kde nejsou tak výrazné skoky posuvových rychlostí, mají funkce FNORM, FLIN a FCUB zanedbatelný vliv. Dále bylo zjištěno, že na posuvovou rychlost a celkově na obrábění má významný vliv souhrn parametrů. Především cyklus 832, který v sobě má libovolně automaticky aktivované funkce kompresor NC bloků COMPCAD a G64, respektive při tomto experimentu byla aktivována funkce G645.

Dalším významným krokem by bylo sledování dynamiky vibrací při jednotlivých funkcích Sinumeriku pro posuvovou rychlost. Také by bylo vhodné zkoumat rozdíly ve vibracích a kvalitě povrchu při obrábění vnitřního rádiusu frézou pomocí těchto funkcí. Zkoumání tohoto vlivu bylo ale nad rámec této diplomové práce.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *MCU450V* [online]. B.m.: KOVOSVIT MAS. 2020. Dostupné z: www.kovosvit.cz
- [2] Siemens. *Siemens Česká republika* [online]. 11. leden 2024 [vid. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/cz/cs/products/automation/systems/cnc-sinumerik.html>
- [3] KRULIŠ, Martin. *Nástroje systému Sinumerik pro řízení posuvové rychlosti a jejich praktické využití*. Plzeň, 2022. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] *Siemens SINUMERIK 840D / 840Di / 810D - Příručka programování - Cykly*. B.m.: Siemens AG 2004. 2004
- [5] PEŠICE, Matěj. *Identifikace parametrů pro ovlivnění přesnosti a produktivity obrábění ve vazbě CAM - řídicí systém*. Praha, 2018. ČVUT v Praze.
- [6] *SINUMERIK 840D sl/ 828D - Základy - Programovací příručka*. B.m.: Siemens AG 2010
- [7] NEZBEDA, Lukáš. *Optimalizace NC kódu pomocí Eureka Chronos*. Plzeň, 2021. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] *Optimization software saves time* [online]. [vid. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/articles/optimization-software-saves-time>
- [9] TARKA, Bartosz. *Eureka Chronos - Optymalizacja programu NC. SOLIDMANIA* [online]. 3. listopad 2020 [vid. 2024-01-10]. Dostupné z: <https://solidmania.com/eureka-chronos-optymalizacja-programu-nc/>
- [10] EUREKA for CHRONOS - SolidVision. *SolidVision* [online]. [vid. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/cam-reseni/simulace-a-optimalizace-nc-kodu/eureka-chronos>
- [11] *Eureka for Chronos*. B.m.: Roboris. Copyright -2020 2013
- [12] *Eureka Chronos - User manual*. B.m.: Roboris. 2021
- [13] *SINUMERIK 840D sl / 828D pro pokročilé*. B.m.: Siemens AG Industry Sector. 2010
- [14] Formulas and definitions for milling. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2024-04-09]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx
- [15] *Siemens Sinumerik 840Di - Manual*. B.m.: Siemens AG 2003
- [16] *Trace - SINUMERIK 840D sl SINUMERIK Operate - ID: 109769186 - Industry Support Siemens* [online]. [vid. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/109769186?c=73383547787&lc=en-CZ>