

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Mechanické parametry obráběcího stroje a jejich vliv na výpočet
strojního času**

Mechanical parameters of machine tool and their influence to
machining time calculation

Autor: Jan Hušek

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Tomíček Ph.D.

Praha 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu citací.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Tomíčkoví Ph.D. za jeho ochotu a odbornou pomoc, zejména při přípravě praktických experimentů, a také za poskytnutí cenných rad, které jsem využil při psaní této práce.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá možnými příčinami nežádoucích vlivů na výpočet strojního času při obráběcím procesu v závislosti na mechanických parametrech a členech obráběcího stroje. Jsou zde popisovány metody a praktické experimenty pro korekci strojního času vygenerovaného CAM softwaru, ve snaze se co nejvíce přiblížit skutečné době obrábění. Na základě zjištěných poznatků o jednotlivých zdrojích nežádoucích časových odchylek byl proveden vlastní experiment na vybraném CNC obráběcím stroji a následně nastíněny možnosti tvorby kompenzačního vzorce pro korekci časového výpočtu CAM softwarů.

Klíčová slova

strojný čas, CAM software, konstrukce CNC strojů, rychlost a zrychlení servopohonů

Abstract

Bachelor thesis is focusing to possible causes of undesirable influences on machining process time calculation according to mechanical parameters and parts of machine tool. There are described various methods and practical experiments to correction machining time generated by CAM software. The aim of this thesis is approaching to value of the real machining time. According to found informations about undesirable time divergences, there was realized own practical experiment on selected CNC tool. The results of this experiment can be used to create a compensatory formula for correction machining time.

Key words

machining time, CAM software, construction of CNC tool, velocity and acceleration of servo drive

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1. Úvod	9
2. Význam CAM softwaru a postprocesoru při stanovení strojního času	10
2.1. Inovace v odvětví CAM softwarů a CNC systémů	10
2.1.1. <i>Vortex</i>	11
2.1.2. <i>Machine DNA</i>	11
2.2. Interpolace NC kódu a její časové prodlevy.....	12
3. Vliv pohybových vlastností pohonů na strojní čas	14
3.1. Vliv rychlosti a zrychlení servopohonů	14
3.2. Setrvačné účinky pohonů na strojní čas	16
3.3. Rychlost (jerk/ruck) a jeho vliv.....	16
3.3.1. <i>Vliv mechanických vibrací</i>	17
4. Odhad doby obrábění pomocí analytické metody	18
4.1. Regrese pro minimální posuv	19
4.2. Odhad doby obrábění pomocí lineární rychlosti posuvu.....	23
5. Odhad strojního času pomocí distribuce NC bloků	26
5.1. Nanointerpolace	26
5.2. Rozložení bloku a chyby strojního času	26
5.3. Model k určení strojního času pomocí distribuce NC bloků	28
6. Mechanická metoda pro odhad strojního času	31
6.1. Čas odezvy stroje (MRT).....	31
6.2. Princip stanovení MRT	31
6.3. Výpočet skutečného času obrábění pomocí MRT	32
6.4. Použití mechanické metody v praxi	33

7. Vyhodnocení a využití poznatků pro vlastní experiment.....	37
7.1. Analýza strojního času dle průběhu rychlosti posuvu	38
7.2. Analýza strojního času v závislosti na úhlu mezi drahami sousedních bloků	44
7.3. Statistická analýza strojního času	46
7.4. Shrnutí výsledků z praktického experimentu	49
8. Závěr.....	50
9. Seznam obrázků	51
10. Použitá literatura	52

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Plné znění	Český překlad
NC	Numerical control	Číslicově řízený stroj
CNC	Computer numerical control	Počítačově číslicově řízený stroj
CAD	Computer aided design	Počítačem podporované projektování
CAM	Computer aided manufacturing	Počítačová podpora obrábění
MRT	Machine response time	Čas odezvy stroje

Symbol	Význam symbolu	Jednotka
a	Hodnota zrychlení/zpomalení zadaná do systému stroje	[m/s ²]
t_i	Doba obrábění i-tého bloku	[s]
t_{ai}	Doba zrychlení	[s]
t_{di}	Doba zpomalení	[s]
t_{ui}	Čas rovnoměrné rychlosti v i-tém bloku	[s]
d_i	Vzdálenost i-tého bloku	[m]
d_{ai}	Vzdálenost úseku pro zrychlení	[m]
d_{di}	Vzdálenost úseku pro zpomalení	[m]
$f(i)$	Naprogramovaná rychlost posuvu i-tého bloku	[m/min]
$f_{min}(i)$	Minimální posuv i-tého bloku	[m/min]
$f_{min}(i-1)$	Minimální posuv předchozího bloku	[m/min]
$f_{max}(i-1)$	Maximální posuv předchozího bloku	[m/min]
$f_{max}(i)$	Maximální posuv i-tého bloku	[m/min]
T	Celková doba obrábění	[s]
s_i	Délka i-tého segmentu	[m]
f_p	Rychlost konstantního posuvu	[m/min]
θ	Úhel mezi sousedními bloky	[°]

1. Úvod

V technické praxi, v odvětví programování CNC obráběcích strojů a center, je v automatizované výrobě základním stavebním kamenem příslušný NC program. Tento NC program je vlastně soubor dat, v určitém normalizovaném kódu, který vznikl na základě navrženého 3D modelu. Pro transformaci geometrie modelu součásti na příslušná data programu slouží konstruktérům takzvané CAM softwary. Tyto softwary lze využít, mimo kompletní simulaci daného obráběcího cyklu, i ke generování času obrábění. Zde ale nastává stěžejní problém, kdy v drtivé většině případů tento vypočítaný strojní čas neodpovídá skutečné době obrábění, potřebné pro výrobu dané součásti. Tyto časové odchylky úzce souvisí s aktuálním stavem CNC obráběcího stroje, který je závislý na jeho samotné konstrukci a mechanických vlastnostech.

V této práci bych se tedy rád zaměřil obecně na studii možných parametrů CNC stroje, které ve větší či menší míře ovlivňují časové rozdíly skutečného strojního času vůči času, generovaného CAM softwary. Jako mechanické parametry stroje jsou v této práci myšleny především ty, které ovlivňují kinematiku řezného nástroje na základě nastavených řezných podmínek. Zaměřím se zde hlavně na problematiku vlivu rychlosti a zrychlení servopohonů stroje, tedy průběh strojního posuvu a rychloposuvu během obecného rovinného obráběcího procesu, a parametry, ovlivňující trajektorii nástroje při obrábění kontury součásti, kteréžto veličiny považuji za nejdůležitější. Nebudu tedy uvažovat například vůle ve vodících plochách pracovního stolu či jiné geometrické nepřesnosti mechanických členů stroje, ale zaměříme se jen na ty parametry, které lze snadno vyhodnotit na základě jednoduchých měření v rámci vlastního praktického experimentu.

2. Význam CAM softwaru a postprocesoru při stanovení strojního času

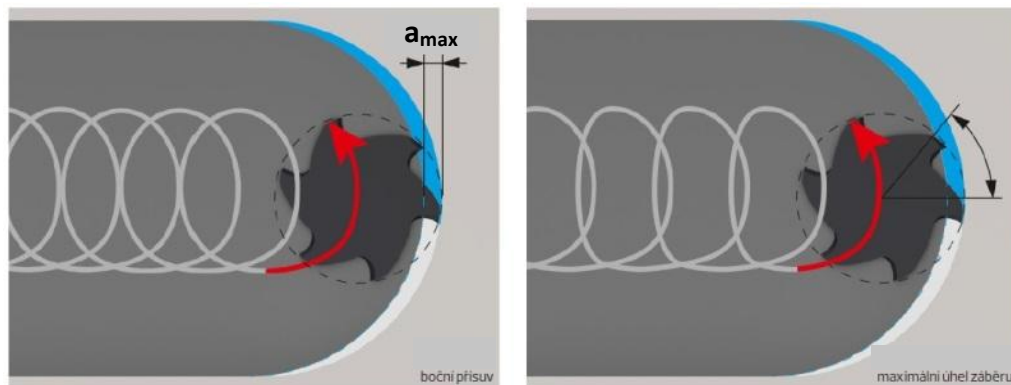
Software CAM (Computer Aided Manufacturing), neboli počítačem podporovaná výroba, umožňuje v odvětví programování CNC strojů zpracovat digitalizovaný 3D model vytvořený programem CAD (computer aided design). Během tohoto procesu software zmapuje geometrii a kontury součásti a současně do modelu vkládá technologické zásady, znalosti či zkušenosti. Pomocí simulace lze i zobrazit celý technologický postup výroby daného výrobku. Úzce spojený se softwarem CAM je tzv. postprocesor, který transformuje data daného modelu, trajektorie nástroje, do normalizovaného kódu, zadaného řídicímu systému stroje. S CAM softwarem dále spolupracuje verifikační software, který simuluje chyby programu pro CNC obrábění, jako jsou kolize stroje, žlábký, nebo chyby v důsledku rychlého posuvu a automaticky optimalizuje rychlost posuvu s cílem dosažení efektivnějšího obrábění.

2.1. Inovace v odvětví CAM softwarů a CNC systémů

Důležitým parametrem ovlivňujícím strojní čas z pohledu CAM softwarů je bezprostředně způsob generování pohybu řezného nástroje, zejména při hrubovacích cyklech, prostřednictvím těchto softwarů. U starších verzí CAM softwarů jsme se mohli setkat s principem, kdy je trajektorie nástroje vytvářena na základě modelu finálního obrobku s respektováním grafického modelu polotovaru obráběné součásti. Nebyly ale vygenerovány dostupnými strategiemi řezné pohyby v místech, kde nebyl například definován polotovar z důvodu geometricky komplikovaného 3D modelu. Inovace v CAM softwarech v posledních 5 letech přinesly nový pohled na kontrolu kinematiky obráběcího stroje prostřednictvím simulace. Softwarey zohledňují skutečný a aktuální stav CNC obráběcího stroje, který má vykonávat obráběcí proces dle daného NC programu. Strojní čas vynaložený na zpracování daného obrobku se tedy mohl zkrátit díky návaznosti systému na skutečné dynamické schopnosti obráběcího stroje. [1, 2]

2.1.1. Vortex

Jednou ze zmiňovaných inovací je software Vortex. Strategie této technologie je založena na vytváření trochoidních tvarů dráhy řezného nástroje, při kterých je zaručeno jeho ideální konstantní opásání a dále díky možnosti naprogramování minimálního poloměru trochoidní dráhy nástroje, můžeme ovlivnit nežádoucí prodlevy, které prodlužují celkový strojní čas. Poloměr této trochoidní dráhy totiž ovlivňuje nežádoucí přetížení řezného nástroje, zejména při kruhových interpolacích v rozích uzavřené kapsy, kde narůstá úhel opásání, což způsobuje zpomalování servopohonů stroje. Hodnota daného rádiusu může být automaticky vyhodnocena pomocí dalšího dílčího systému, Machine DNA, který danou hodnotu doplní do programu v závislosti na nastavení stroje. [2]



Obr. 1: Trochoidní obrábění při konstantním opásání nástroje [14]

2.1.2. Machine DNA

Díky Machine DNA je tak možné zefektivnit obráběcí proces a to nejen z pohledu CAM softwarů, ale i v přímé návaznosti na aktuální stav mechanických částí stroje, neboť každý CNC stroj se od sebe liší v mnoha ohledech a možnostech, jako je například obrábění malých rádiusů při velkých rychlostech strojního posuvu a rychlosti zpracovávání dat NC kódu. Simulace je založena na specifickém NC programu, který otestuje daný obráběcí stroj, či centrum na základě dat získaných z četné řady senzorů. Tyto data jsou před aplikací postprocesoru převedena zpět do CAM softwaru, kde jsou analyzována a poté využita pro optimalizaci v procesu generování trajektorie řezného nástroje a pro návrh strategií, při nichž můžeme dosáhnout maximální efektivity. Kromě nastavení minimálního poloměru trochoidy, při kterém zamezíme zpomalení

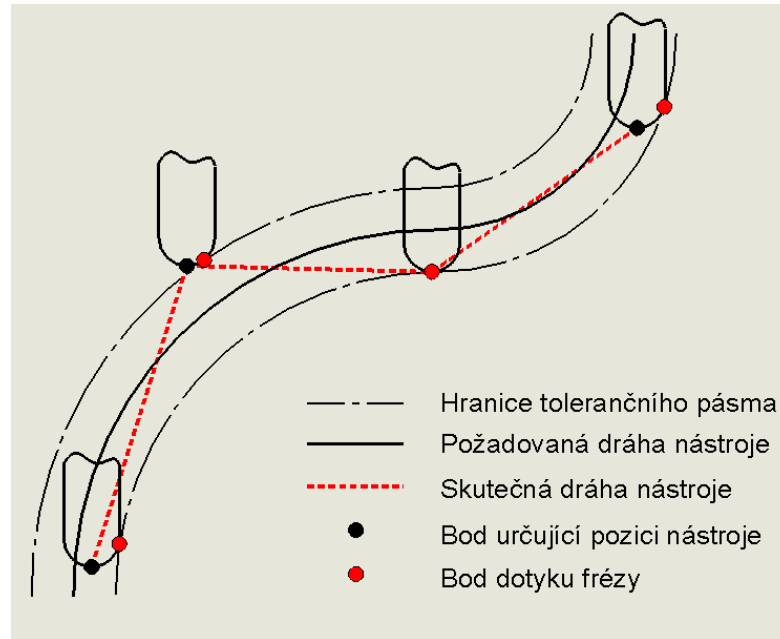
interpolátorů, je navíc tolerováno ideální rozložení bodů trajektorie nástroje. Analýza stroje se provádí zejména při servisním zásahu, kdy jsou například vyměněny mechanické části stroje, které ovlivňovaly jeho správný chod, ať už vlivem periodického stárnutí či vlivem vnějšího defektu. [1, 2, 3]

2.2. Interpolace NC kódu a její časové prodlevy

Základní problematika narůstajících odchylek času generovaného CAM softwaru od skutečného strojního času, při obrábění na CNC strojích, je ukryta v předpokladu, že daný výrobní proces probíhá ve všech bodech NC programu námi zadaným posuvem. Ve skutečnosti je však z důvodu načítání jednotlivých řádků programu systémem stroje často celý proces zpomalen. Data zpracována postprocesorem, která vstupují do řídicího systému stroje, jsou interpolátorem vložena do časově parametrizovaných dat. Zde se vyskytuje problém velkého množství dat, které musí být interpolátorem zpracováno. Tato data vznikají díky linearizaci bodů křivky odpovídající žádanému tvaru obrobku. Princip postupu generování trajektorií nástroje je u většiny CAM softwarů založen na výpočtu uzlových bodů (cutter-contact point) skrze geometrii 3D modelu, vytvořeného CAD programem. Poté se zahrne do výpočtu offset nástroje, čímž jsme schopni stanovit jednotlivé polohy řezného nástroje (cutter-location points) pro generování NC programových bloků. Ty jsou generovány s pomocí klasické metody určené k vytvoření trajektorie nástroje, tedy pomocí zmíněné lineární interpolace přímkových segmentů. Software CAM nastavuje délky segmentů těchto úseků tak, aby se vešly do definovaného tolerančního pásma. Čím menší je tolerance, tím více se bude blížit trajektorie nástroje k původnímu CAD 3D modelu, a proto musí být lineární segmenty generované takovým postupem, aby se pro velmi složité zakřivené dráhy počet segmentů výrazně zvýšil spolu s velikostí NC programu. [4, 6]

Již tedy v úseku kdy jsou zpracovávána data, vycházející z CAM softwaru, vznikají první nepřesnosti ve strojních výpočtech. Důvodem jsou odchylky od ideálního povrchu dílce, vzhledem k nastaveným úchytkám přesnosti lineárních úseků, které nahrazují ideálně hladký povrch, jak můžeme vidět na obrázku 2. Jinak řečeno je změněna dráha, jakožto jedna z veličin definujících výpočet spotřebovaného času. V případě, že by byl daný NC kód transformován do skutečné lineární trajektorie nástroje, tedy by došlo k propojení všech jejích zlomových bodů, musely by pohony v

každém v tomto bodě nejdříve maximálně zrychlit a následně co nejrychleji zbrzdit na nulovou hodnotu. To by poté mělo za následek nežádoucí narůstání strojního času vlivem dynamického kolísání rychlosti pohonů os, které nemohou na těchto linearizovaných úsecích, o velikosti v řádech desetin a setin milimetru, dosáhnout svého maximálního zrychlení. [6]



Obr. 2: Schéma trajektorie nástroje s tolerančním polem [6]

Řešení této problematiky se dnes ve většině systémech řeší na základě funkce Look-ahead, v doslovném překladu znějící jako pohled vpřed, pomocí níž se dosáhne dopředného načítání NC bloků. V každém ze zlomových bodů je pak určeno pásmo možných odchylek, které umožňuje průjezd navazujících bloků nenulovou rychlostí, avšak naproti tomu díky tolerančnímu pásmu přibývají další malé odchylky skutečné polohy nástroje od polohy dané NC programem. [6]

V praxi se pak často celková časová prodleva řeší přepočtem daných spotřebovaných výrobních časů experimentálně stanovenými koeficienty pro jednotlivé výrobní činnosti a pro jednotlivé CNC stroje. Nicméně ani tento výsledný čas však mnohdy neudává požadovanou přesnost. [5]

3. Vliv pohybových vlastností pohonů na strojní čas

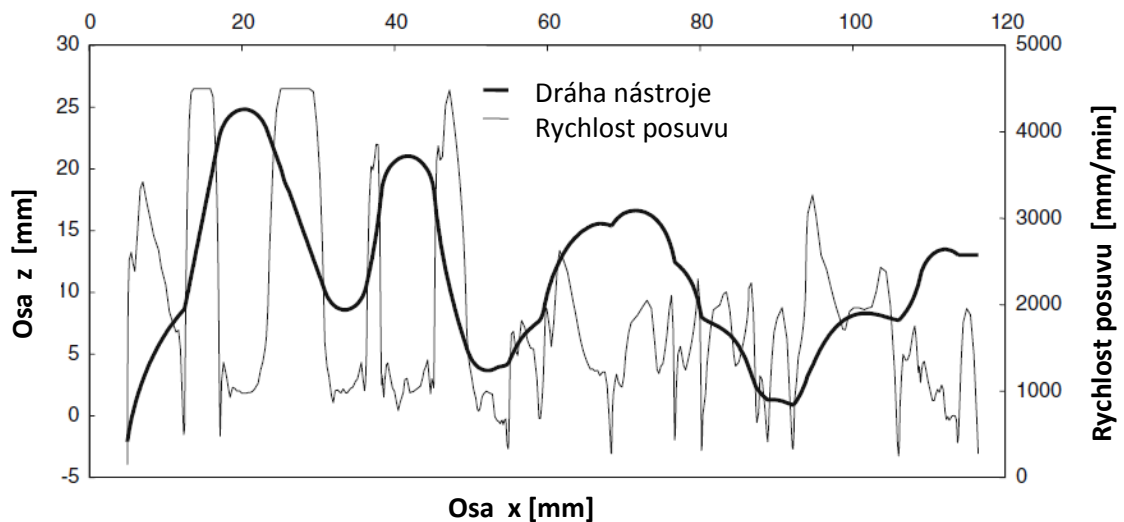
Každý CNC stroj nebo centrum si lze představit jako mechatronickou soustavu skládající se z mnoha hybných strojních částí a mechanismů, které právě svými kinematickými a dynamickými vlastnostmi mohou ovlivnit strojní čas. Zejména jsou to pohybové osy pro manipulaci obrobku a nástroje, tedy pohon stolu a vřetene. Mechanická soustava je vzájemně propojena s numerickým řízením pohonů přes řídicí systém stroje, který řídí jednotlivé akční členy pohybových os. Tyto akční členy potom kontroluje systém PLC, programovatelný logický automat, který mimo jiné vygeneruje právě i kontrolu časovou. Řídicím systémem stroje transformuje daný NC program, uložený například v ISO kódu, na pohyb nástroje dle zadaných trajektorií. Poloha nástroje je však ovlivněna dynamickými vlastnostmi řízení pohonů, například plynulostí chodu, která je závislá na vlastní konstrukci stroje. [4, 8]

3.1. Vliv rychlosti a zrychlení servopohonů

Rychlost a zrychlení jsou z hlediska konstrukce definovány v strojních parametrech systému stroje. Základním problémem je však skutečnost, že výrobci CNC strojů udávají pouze maximální hodnotu posuvové rychlosti a rychloposuvu os, zatímco hodnota zrychlení, která má velký význam pro výpočet skutečného času obrábění, nám zůstává utajena. Vzhledem k tomu, že tyto dvě stroji předepsané veličiny jsou zadány v systému v maximálních možných hodnotách, vzniká při generování strojního času další odchylka, neboť software počítá právě s touto maximální hodnotou, které se však mnohdy, při obrábění zejména krátkých úseků, zdaleka nedosáhne. Možností, jak lze ovlivnit výsledné zrychlení pohonu, je regulace řídicího systému stroje. V praxi se můžeme setkat s takzvaným regulačním faktorem pohonů K_v , který určuje přesnost obráběcího procesu. Funkcí této konstanty je potlačit závislost velikosti polohové chyby, tedy rozdíl mezi ideální a skutečnou trajektorií, na rychlosti obrábění. [11, 12]

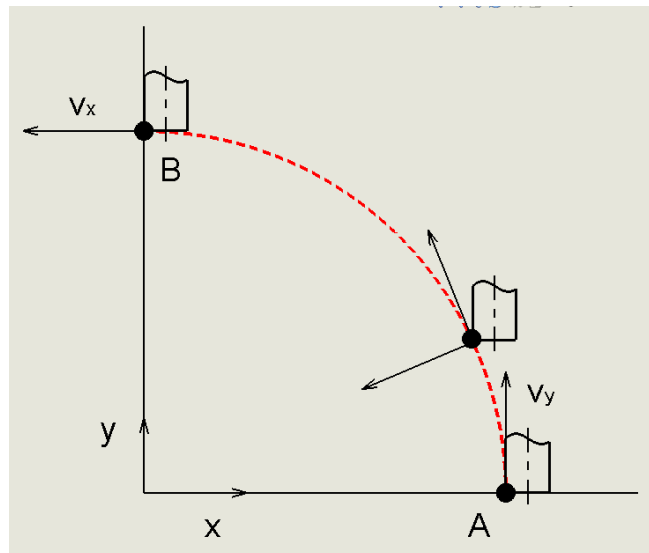
Aby CNC stroj dosáhl, zejména při frézování geometricky náročnějších ploch, vysokých rychlostí posuvů, musí být přímkové úseky segmentů tak dlouhé, aby se strojní inerciální čas urychlil podle jeho schopností. Pokud jsou však délky segmentů delší, například v případě, kdy povrch součásti tvoří dlouhé složité křivky, bude výsledná geometrie velmi odlišná od původního modelu. Na druhou stranu, pokud

budou segmenty kratší, budou sice odpovídat lépe požadované geometrii součásti, ale výsledný NC program bude dlouhý a hlavně nebude dosažena vysoká rychlost posuvu z důvodu dodržení tolerančního pásma. Na obrázku 3 můžeme vidět konkrétní hodnoty získané z vysokorychlostního obráběcího procesu, založeném pouze na lineární interpolaci, kde je patrná změna rychlosti posuvu během pohybu nástroje. Součet délek všech segmentů po linearizaci činil 611,99 milimetrů, zatímco délka skutečné trajektorie měla být 600 milimetrů. Doba obrábění byla stanovena na základě nastavené rychlosti posuvu 4 500 milimetrů za minutu na 8,1 sekund. Ve skutečnosti byla však doba obrábění mnohem delší, z čehož lze usoudit, že skutečná průměrná rychlost posuvu, je výrazně snížena v porovnání s naprogramovaným posuvem, a proto taky nelze uvažovat strojní čas vygenerovaný CAM softwary za spolehlivý. [9, 10]



Obr. 3: Kolísání rychlosti posuvu při lineární interpolaci [6]

V případě kruhové interpolace, kdy je obráběn tvar čtvrt kružnice o určitém poloměru, jak je vidět na obrázku 4, je v počátečním bodě dráhy nástroje (bod A) maximálně zrychlován pohon ve vodorovném směru, tedy ve směru osy X. Naopak v konečném bodě této trajektorie (bod B), při přechodu na vodorovnou přímku, je prováděna skoková změna zrychlení na nulovou hodnotu v ose Y. Tyto skokové změny zrychlení se vyskytují obecně u jakékoli náhlé změny křivosti trajektorie a jsou obvykle doprovázeny rázy od pohonů a vibracemi. [7, 10]



Obr. 4: Vektorové znázornění pohybu pohonů při rovinné kruhové interpolaci [10]

Dalším negativním vlivem může být zadržávání supportů NC stroje. To je většinou způsobeno vlivem malých posuvových rychlostí, kdy musí pohon supportu v každém vygenerovaném bodě křivky rozjíždět a následně zastavovat, při čemž se zvyšuje tření v kluzných plochách vedení. [10]

3.2. Setrvačné účinky pohonů na strojní čas

Vliv na nežádoucí zvýšení strojního času mají v určité míře i setrvačné účinky od hmoty obráběného materiálu působící na zrychlování popřípadě zpomalování pohonů stroje. S tím souvisí parametry jako jsou velikosti posouvajících se tíhových hmot a jejich pasivní odpory (zejména smykové tření), které mají za následek, že se čas koncového dojezdu pohonu zkracuje a naopak čas, potřebný pro rozjezd pohonu se v určité míře prodlužuje. [15]

3.3. Ryv (jerk/ruck) a jeho vliv

Definice samotného zrychlení by však pro CNC stroj v dnešní době neměla velký význam, zvláště u objemných dynamických strojů, proto byl zaveden interpolační parametr zvaný ryv, definovaný jako derivace zrychlení. Hodnota ryvu je omezena buzením mechanických vibrací, které rostou společně s jeho hodnotou. Za podmínky, že je tento parametr korektně nastaven v systému stroje, je chod zařízení ustálenější a nedochází k trhavým pohybům suportů. V případě, že by nebylo použito tohoto parametru, rychlostní průběhy servopohonů by byly ostré a lineární, což by mělo vliv

na dynamiku celého CNC stroje. Docházelo by totiž k odchýlkám dráhy nástroje od požadovaných hodnot vlivem opožděného brzdění pohybu osy. [2, 10]

Parametry rychlosti, zrychlení a ryvu společně definují pohybové osy stroje, bez jejichž znalosti by nemohl CAM software blíže určit celkový strojní čas. Avšak z výše uvedených odstavců vyplývá, že CAM software ani vlastně postprocesor neuvažují pro výpočet strojního času aktuální stav těchto hodnot, zejména čas a dráhu pro zrychlení pohonu, a daný úsek vnímá, jako by se pohon po celou dobu od počátečního do koncového bodu pohyboval konstantní rychlostí. Tato skutečnost je důvodem, proč CAM softwary vyhodnocují ve většině případů dobu obrábění odlišnou od té skutečné.

3.3.1. Vliv mechanických vibrací

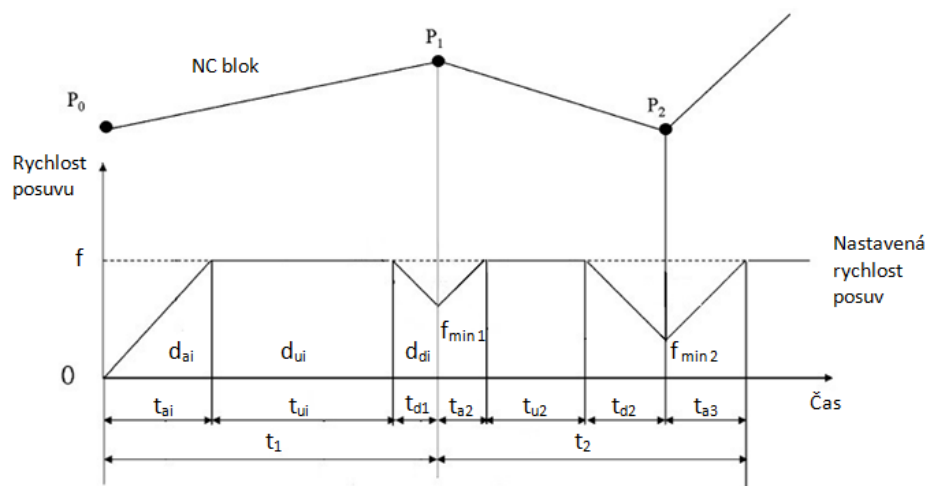
Prakticky při každém obráběcím procesu pomocí mechanického způsobu odebírání třísky vzniká ve stroji nežádoucí kmitání. To významně ovlivňuje, mimo strukturu povrchu, právě i plynulost pohybu servopohonů, které řídí řezný nástroj po zadané trajektorii. Na CNC obráběcím stroji se můžeme setkat s třemi základními druhy mechanických kmitů. Jsou to vibrace přirozené, vynucené a samobuzené. Největší vliv však mají vibrace samobuzené, při kterých vznikají kmity, které mají rychle se zvyšující amplitudu, vlivem periodicky proměnné řezné síly. K těmto vibracím dochází zejména při obrábění s velkou hloubkou řezu. [12, 15]

4. Odhad doby obrábění pomocí analytické metody

Obecně se každý NC program skládá z lineárního řezného pohybu nástroje, reprezentovaného funkcí G01, a z rychloposuvu, reprezentovaného funkcí G00. Obě tyto pohybové funkce jsou definovány rozsahem zrychlení, rovnoměrnou rychlostí a rozsahem zpomalení, jak je znázorněno na obrázku 5. V případě že je vzdálenost bloků velmi krátká, maximální rychlost posuvu nemůže dosáhnout svého maxima a zadaný rozsah rychlosti může být v bloku vymazán. Z toho lze usoudit, že profil rychlosti společně se vzdáleností bloků jsou základními faktory pro určení skutečného strojního času. Řekněme, že v tomto případě budeme předpokládat nastavení lineárního profilu rychlosti posuvu, který je CNC obráběcím centrem běžně poskytován. Díky tomuto předpokladu můžeme spočítat dobu obrábění každého NC bloku dle rovnice (1). [13]

$$t_i = t_{ai} + t_{ui} + t_{di} = \frac{f(i) - f_{min}(i-1)}{a} + \frac{d_i - d_{ai} - d_{di}}{f(i)} + \frac{f(i) - f_{min}(i)}{a} \quad (1)$$

Z uvedeného vztahu lze usoudit, že klíčovou roli pro stanovení strojního času tedy hraje minimální rychlost posuvu na začátku a na konci každého bloku. Minimální posuv v počátečním bodě bloku je důležitý především pro určení vzdálenosti a času zrychlení, zatímco v koncovém bodě nám minimální posuv umožňuje určit vzdálenost a čas zpomalení. Abychom tedy stanovili skutečný strojní čas, musíme přesně odhadnout a stanovit tyto minimální posuvové rychlosti. Ty jsou však ovlivňovány mnoha faktory, a proto je lze zjistit jen experimentální cestou. [13]



Obr. 5: Profil rychlosti posuvu při spuštění NC programu [13]

4.1. Regrese pro minimální posuv

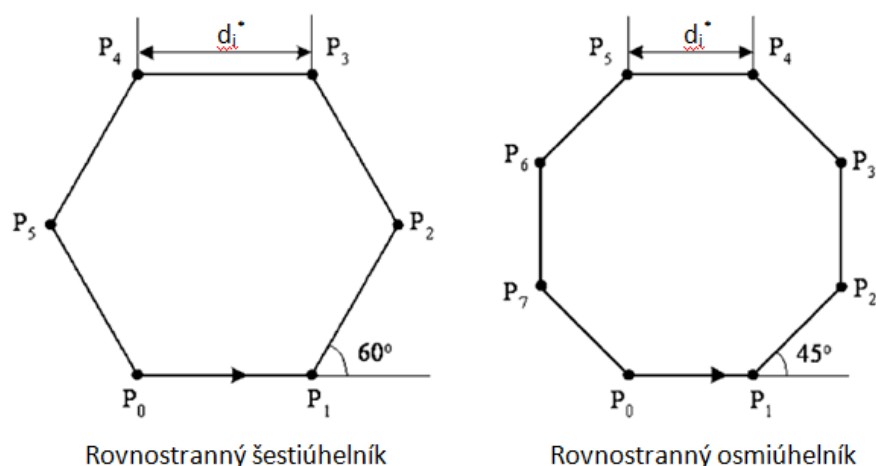
Vzhledem ke skutečnosti, že není v technické praxi dostupná žádná metoda pro stanovení minimální rychlosti posuvu mezi dvěma sousedními bloky, bude minimální posuv určen na základě experimentu, provedený E. Y. Heoem a jeho kolektivem, který nyní v následujících odstavcích popíši. Tato studie je založena na měření celkového času obrábění kontur ve tvaru pravidelných mnohoúhelníků, které jsou charakterizovány stejnou vzdáleností drah a stejnými úhly mezi těmito drahami bloků, jak můžeme vidět na obrázku 6. Pro odvození času obrábění krátkých bloků vychází pan Heo z předpokladu, že je v celém programu dodržen lineární profil zrychlení a zpomalení. Vzdálenost akcelerace, popřípadě zpomalení a strojní čas i -tého bloku můžeme získat na základě rovnic (2, 3, 5). [13]

$$d_{ai} = \frac{f_{max}^2(i) - f_{min}^2(i-1)}{2a} \quad (2)$$

$$d_{di} = \frac{f_{max}^2(i) - f_{min}^2(i)}{2a} \quad (3)$$

$$d_i = d_{ai} + d_{di} \quad (4)$$

$$t_i = t_{ai} + t_{di} = \frac{f_{max}^2(i) - f_{min}^2(i-1)}{2a} + \frac{f_{max}^2(i) - f_{min}^2(i)}{2a} \quad (5)$$



Obr. 6: Kontury ve tvaru polygonů použitých v experimentu E. Y. Heoa [13]

Fréza, pohybující se po trajektorii zadané kontury, provádí iteraci cyklického pohybu na polygonu, pro minimalizaci chyb při měření. Pro odhad strojního času jednotlivých krátkých bloků, je nastavena hodnota maximální délky strany těchto mnohoúhelníků. E. Y. Heo uvádí, že pokud si vezmeme n -tou iteraci pro m -tou stranu vybraného polygonu, můžeme tak odvodit celkový čas pro obrobení dané kontury (polygonu) dle rovnice (7), při dodržení podmínek daných vztahy (8, 9, 10). [13]

$$T = \sum_{i=1}^{mn} t_i = \sum_{i=1}^{mn} (t_{ai} + t_{di}) = \sum_{i=1}^{mn} \left[\frac{f_{max}(i) - f_{min}(i-1)}{a} + \frac{f_{max}(i) - f_{min}(i)}{a} \right] \quad (6)$$

$$T = 2 \cdot \frac{f_{max}(1)}{a} + (2mn - 2) \cdot \frac{f_{max} - f_{min}}{a} \cong 2mn \cdot \frac{f_{max} - f_{min}}{a} \quad (7)$$

$$f_{min}(0) = f_{min}(mn) = 0 \quad (8)$$

$$f_{min}(1) = f_{min}(2) = \dots = f_{min}(mn - 1) \quad (9)$$

$$f_{max}(1) = f_{max}(2) = \dots = f_{max}(mn - 1) \quad (10)$$

Pokud je znám čas zrychlení a zpomalení, můžeme poté získat pro tento experiment i minimální, popřípadě maximální rychlost posuvu s využitím poloviční délky strany polygonu značenou symbolem d_a^* , dle rovnice (12, 13). [13]

$$t_a^* = t_d^* = \frac{f_{max} - f_{min}}{a} = \frac{T}{2mn} \quad (11)$$

$$f_{min} = \frac{d_a^*}{t_a^*} - \frac{1}{2} a \cdot t_a^* \quad (12)$$

$$f_{max} = \frac{d_a^*}{t_a^*} + \frac{1}{2} a \cdot t_a^* \quad (13)$$

Pro určení minimálního posuvu je v tomto experimentu uvažováno několik podmínek. Jsou brány konkrétní hodnoty vzdálenosti pro zrychlení a zpomalení, které činí 0,05 a 0,50 milimetrů. Jsou zvoleny úhly mezi drahami bloků, které nabývají velikosti 40°, 45°, 60°, 72° a 90°. Poslední podmínkou je nastavená rychlost posuvu, která se rovná 5 000 milimetrů za minutu.

Tabulka 1: Parametry CNC obráběcího stroje použitého v experimentu E. Y. Heoa [13]

Použitý stroj	SIRIUS-U
Typ regulátoru	FANUC-18M
Rozsah pracovního prostoru [mm]	500 x 500 x 500
Maximální rychlost posuvu [mm/min]	20 000
Maximální rychlost vřetena [ot/min]	10 000
Koeficient zrychlení a zpomalení pro řezný pohyb	1 200 000
Koeficient zrychlení a zpomalení pro rychloposuv	18 000 000

V tabulce 2 můžeme vidět výsledky výše popisovaného experimentu, který nám uvádějí naměřený strojní čas, minimální a maximální rychlost posuvu dle rovnic (12, 13) a jejich vzájemný rozdíl. Všechny hodnoty posuvů jsou uvedeny v milimetrech za minutu. Závěr tohoto experimentu, dle E. Y. Heoa, nám odhaluje skutečnost, že maximální posuv dosáhl největší hodnoty v mnohoúhelníku, jehož strany svírají pravý úhel, tedy čtverec. Můžeme si však všimnout, že rozdíl mezi minimální a maximální rychlostí posuvu je v tomto případě minimální.

Pomocí regresní analýzy můžeme poté získat výpočtový model, pro odhadnutí minimální rychlosti posuvu v krátkém bloku ($d_a^* \leq 0,5 \text{ mm}$) dle rovnice (14). Úroveň spolehlivosti této regrese činí 99 %. [13]

$$f_{min}(d_a^*, \theta) = -191 + 3\,971 \cdot d_a^* + 42,1 \cdot \theta \quad (14)$$

Symbol d_a^* je vzdálenost potřebná pro akceleraci a symbol θ představuje úhel mezi bloky. Rozdíl mezi strojními časy může být ignorován v případě dlouhých bloků, protože čas, při kterém se nástroj pohybuje rovnoměrnou rychlostí, zastupuje významnou část z celkové doby obrábění. Tento čas poté můžeme vypočítat z rovnice (1). [13]

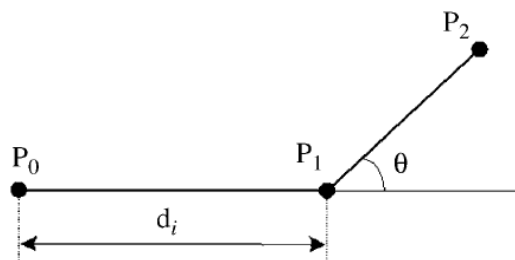
Tabulka 2: Výsledky experimentu pana E. Y. Heoa pro odhad minimální rychlosti posuvu [13]

Počet stran polygonu	Počet iterací	Vzdálenost pro zrychlení (d_a^*)							
		0,05 mm				0,5 mm			
		T^* [s]	f_{\min}	f_{\max}	$f_{\max}-f_{\min}$	T^* [s]	f_{\min}	f_{\max}	$f_{\max}-f_{\min}$
3	3 400	304	52	350	298	304	1 864	2 162	298
4	2 500	291	61	352	291	291	1 916	2 207	291
5	2 000	301	49	350	301	301	1 843	2 144	301
6	1 700	307	49	350	301	307	1 843	2 144	301
8	1 300	313	49	350	301	313	1 843	2 144	301
9	1 200	329	45	349	304	329	1 817	2 122	305

Pozn.: Všechny hodnoty rychlosti posuvu uvedeny v jednotkách mm/min.

Pro tuto práci jsem použil pro ukázkou pouze pár vybraných dat z výše uvedeného experimentu. Podrobnější popis tohoto experimentu, jako jsou podmínky a předpoklady měření, lze nalézt v článku *Estimation of NC machining time using NC block distribution for sculptured surface machining*, kde je zpracováno daleko větší množství dat, které může více osvětlit závěr tohoto experimentu.

Vzhledem k tomu, že hlavními faktory, které ovlivňují minimální rychlost posuvu pro dlouhé bloky programu, jsou nastavená hodnota rychlosti posuvu a úhel mezi bloky, je výše uvedený experiment založený především na monitorování tohoto minimálního posuvu v závislosti na změně nastavené rychlosti posuvu a úhlu, který svírají dráhy sousedních bloků. Vzhledem k těmto dvěma nastaveným veličinám, se fréza opakovaně pohybuje na trajektorii, znázorněné na obrázku 7. Během experimentu se zaznamenávají minimální hodnoty posuvu, které se zobrazují na ovládacím panelu obráběcího centra, během každého pohybu řezného nástroje. Ze zaznamenaných hodnot se pak vybírá hodnota minimální rychlosti posuvu. [13]

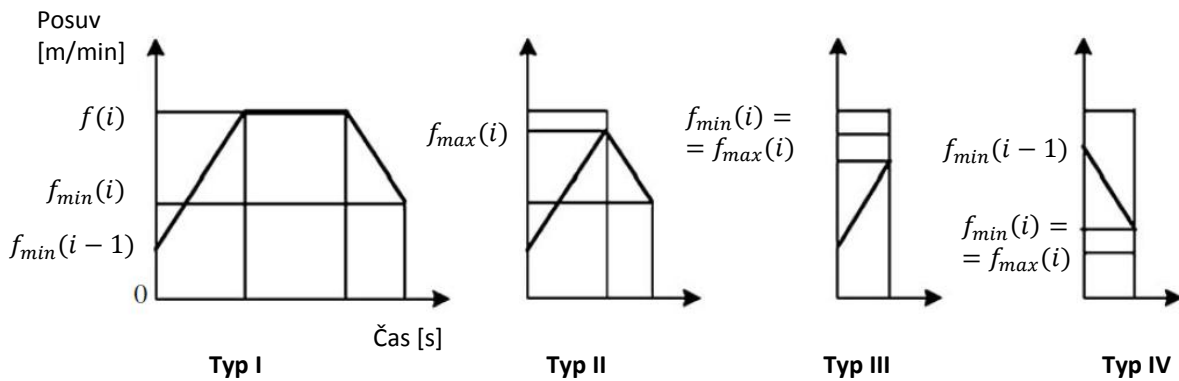


Obr. 7: Obrábění dlouhých bloků [13]

Podobným způsobem, jako byl určen výpočtový model pro krátké bloky, lze následně stanovit i model pro dlouhé bloky. E. Y. Heo pro experiment opět stanovil podmínky, týkající závislosti nastavené rychlosti posuvu na zvolených velikostech úhlů mezi drahami sousedních bloků. Vzhledem k množství dat a k podobnosti s experimentem s krátkými bloky uvádím zde jen výsledek tohoto experimentu, který nám odhalil, že minimální posuv nabývá svého minima mezi bloky, které vzájemně svírají úhel 90°. Pro nahlédnutí na konkrétní data z měření bych poté rád odkázal na článek *Estimation of NC machining time using NC block distribution for sculptured surface machining*.

4.2. Odhad doby obrábění pomocí lineární rychlosti posuvu

Bloky NC programů mohou být dle chování rychlosti posuvu rozděleny na čtyři typy, v závislosti na délce bloku, posuvu a úhlu mezi bloky. Kromě toho, lze strojní čas jednotlivých bloků vypočítat pomocí rovnic, specifických pro každý typ NC programu. V prvním typu bloků jsou známy všechny prvky bloku, neboli zrychlení, rovnoměrná rychlost posuvu i zpomalení. Čas obrábění poté můžeme vypočítat pomocí vztahu (15). Druhý typ bloku je založen na znalosti veličin zrychlení a zpomalení. Rychlost posuvu se snížila a prudce zastavila svůj růst před dosažením nominálního posuvu. Strojní čas lze pak určit dle rovnice (16). Ve třetím ze čtyř stanovených typů je znám pouze úsek zrychlení. S tímto stavem se můžeme setkat pouze v případě, kdy je minimální posuv aktuálního bloku výrazně větší než blok předchozí. Za těchto podmínek je minimální posuv nahrazen dostupnou maximální rychlostí posuvu. To je způsobeno tím, že posuv nemůže dosáhnout vypočítané minimální hodnoty z odhadnutého modelu, a to i přesto, že je tento posuv průběžně zvyšován. Výpočet strojního času je uveden v rovnici (18). V posledním čtvrtém typu je znám pouze zpomalovací úsek bloku. S tímto případem se můžeme setkat pouze za stavu, kdy je minimální posuv aktuálního bloku výrazně menší, než byla rychlost bloku předešlého. Minimální posuv je za těchto okolností nahrazen minimálním dostupným posuvem. Důvodem je skutečnost, že minimální posuv nemůže dosáhnout dle modelu odhadnuté minimální hodnoty a to i v případě, že se posuv neustále snižuje. Doba obrábění můžeme vypočítat pomocí vztahu (20). Grafické znázornění všech čtyř typů bloků dle posuvu můžeme následně vidět na obrázku 8. [13]



Obr. 8: Čtyři případy chování průběhu rychlosti posuvu NC bloku [13]

V praxi se pro frézování geometricky složitých povrchů skládá většina NC programů z mnoha drobných bloků odpovídající typu dva, tři a čtyři. Vzhledem k tomuto faktu by se měl skutečný čas obrábění odhadnout s přihlédnutím na zrychlovací a zpomalovací účinek. V experimentu založeném na krátkých blocích posuv nepřekročil hodnotu 1 000 milimetrů za minutu i přesto, že nastavená rychlost posuvu byla 5 000 milimetrů za minutu. Pro výpočet strojního času NC programu, se provedla studie založená na rekurzivním postupu, který se skládá celkem ze čtyř částí uspořádaných dle schématu na obrázku 9. [13]

$$t_i = \frac{2f(i) - f_{min}(i-1) + f_{min}(i)}{a} + \quad (15)$$

$$+ \left\{ \frac{d_i}{f(i)} - \frac{2f^2(i) - [f_{min}^2(i-1) + f_{min}^2(i)]}{2a \cdot f(i)} \right\}$$

$$t_i = \frac{2f_{max}(i) - f_{min}(i-1) - f_{min}(i)}{a} \quad (16)$$

$$f_{max}(i) = \sqrt{a \cdot d_i + 0,5[f_{min}^2(i-1) + f_{min}^2(i)]} \quad (17)$$

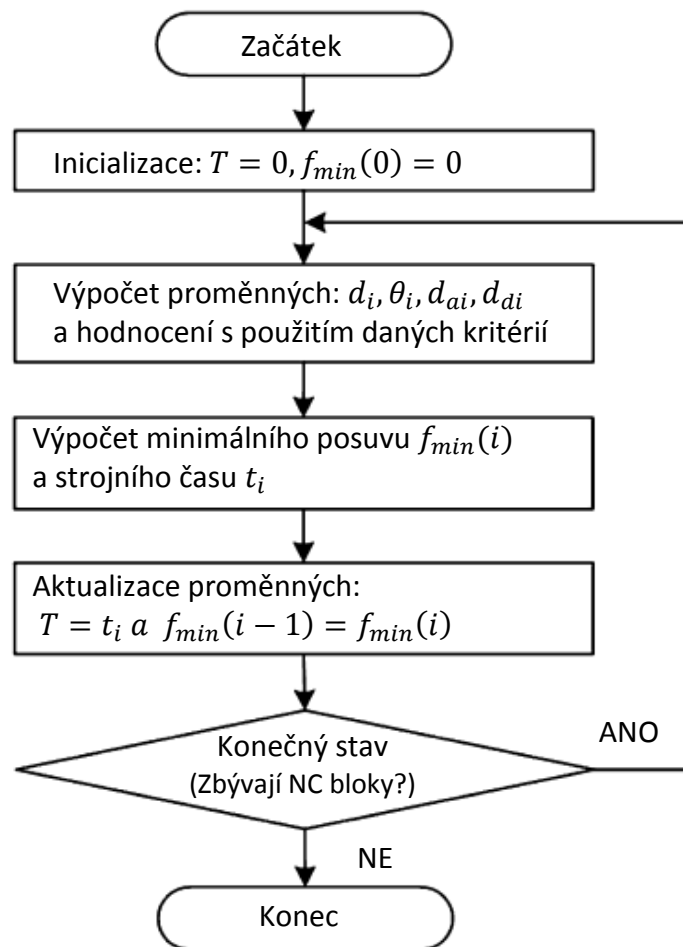
$$t_i = \frac{f_{max}(i) - f_{min}(i-1)}{a} \quad (18)$$

$$f_{max}(i) = f_{min}(i-1) + \sqrt{2a \cdot d_i + f_{min}^2(i-1)} \quad (19)$$

$$t_i = \frac{f_{min}(i-1) - f_{max}^*(i)}{a} \quad (20)$$

$$f_{min}^*(i) = f_{min}(i - 1) - \sqrt{2a \cdot d_i + f_{min}(i - 1)^2} \quad (21)$$

V prvním kroku tohoto postupu je inicializován celkový strojní čas a první minimální rychlost posuvu. Proměnné daného modelu, jako je velikost bloku, minimální posuv a vzdálenost pro zrychlení a zpomalení jsou poté vypočítány v druhém kroku. Následně jsou tříděny jednotlivé bloky pomocí předem definovaných kritérií a vypočítána doba obrábění i-tého bloku. V kroku čtyři jsou pak celkový strojní čas a minimální rychlost posuvu aktualizovány pro další iteraci. V závěru tohoto postupu je kontrolována podmínka, zda byly všechny zbývající bloky zpracovány. [13]



Obr. 9 Rekurzivní algoritmus pro odhad strojního času [13]

5. Odhad strojního času pomocí distribuce NC bloků

Analytický model určený pro odhad řezného času je konstruován na základě předpokladu přesných minimálních rychlostí posuvu. Z tohoto důvodu je nezbytné, vyvinout zařízení, které přesně změří minimální rychlost posuvu NC regulátoru pro zaručení přesného odhadu. V současné době však není taková metoda měření, či měřicí zařízení, dostupné. Proto je zavedena metoda, která sníží chybu odhadu v minimální posuvové rychlosti, založená na distribuci NC bloků. Pokud je délka bloku dostatečná, může být zanedbáno zrychlení nebo zpomalení, a tím i můžeme následně rovnici (15) po aproximaci nahradit vztahem (22). [13]

$$t_i = \frac{d_i}{f} \quad (22)$$

5.1. Nanointerpolace

Důležitou zmínkou v oblasti distribuce NC bloků je takzvaná nanointerpolace, kde již samotný název napovídá o jejím principu. Užití této funkce má velký význam zejména při obrábění málo zakřivených ploch, kde se v daném směru provádějí velmi malé pohyby v řádech mikrometrů. Jednotlivé bloky NC programu jsou rozděleny na interpolační sekce, které jsou zastoupeny různými trajektoriemi a vzdálenostmi. V servosystému je žádaná poloha nástroje počítaná v nanometrech, což minimalizuje odchylky v servosystému a pohyb řezného nástroje po kontuře obrobku je mnohem plynulejší. [10]

5.2. Rozložení bloku a chyby strojního času

Pro obrobek, tvořeného z tvarově složitých ploch, určeného pro tento experiment, byl vytvořen NC program, přizpůsobený pro obrábění pomocí kulové frézy s tolerancí 0,01 milimetrů. Hodnota d_i pro vygenerovaný NC kód se získá pomocí rovnice (23) a je rozdělena na 11 sekcí. Rychlosti posuvu, k níž je vztažena bloková frekvence, nabývají hodnot 500, 1 000 a 1 500 milimetrů za minutu a to při stejném stupni zrychlení nebo zpomalení. Porovnáním skutečné doby obrábění s jmenovitým časem, kde jmenovitý strojní čas získáme z celkové délky řezu vydělené rychlostí posuvu, se frekvence zvyšuje v krátkých úsecích v závislosti na zvyšování rychlosti

posuvu, jak je zřejmé z tabulky 3. Obecně tedy platí, že jakákoliv chyba se pro jmenovitý čas proporcionálně zvyšuje podle většího kmitočtu bloku, v sekcích s kratší délkou. V případě NC kódů sestavených z poměrně delších bloků je pak zřejmé, že chyba mezi nominální dobou obrábění a skutečným strojním časem je snížena a rovnice (22) tak poskytuje přesný odhad doby obrábění. [13]

$$d_i = \frac{f^2}{2a} \quad (23)$$

Tabulka 3: Nominální a skutečný strojní čas v závislosti na rychlosti posuvu [13]

	Rychlost posuvu [mm/min]				
	500	1 000	1 500	2 000	2 500
Jmenovitý čas [s]	50,473	25,236	16,824	12,618	10,095
Skutečný čas [s]	50,900	27,967	22,317	19,850	18,717
Rozdíl [s]	0,427	2,731	5,493	7,232	8,622

E. Y. Heo a kolektiv dosud tímto výzkumem odhalili, že distribuce délky bloku, určená jmenovitou rychlostí posuvu a konstantou zrychlení, popřípadě zpomalení, úzce souvisí se skutečným strojním časem. Přesnost odhadu času obrábění lze zvýšit v případě, že je určen vztah mezi distribucí NC bloku a parametrem d^* , který se následně používá pro rozhodování, zda můžeme NC blok pokládat za dlouhý nebo krátký. Pokud je délka bloku dostatečně dlouhá ($d^* < d_i$), potom je chyba mezi jmenovitým a skutečným strojním časem minimální. Avšak když se délka bloku snižuje ($d^* > d_i$), dopad na chybu se poté výrazně zvyšuje. Proto je v tomto experimentu využito pět typů funkce $f(d^*)$ k získání hodnoty d^* , která znázorňuje charakteristiku blokové distribuce. [13]

V případě průměrné hodnoty se zvolí konstanta posuvu, zrychlení nebo zpomalení a tím pak můžeme snadno získat délku úseku bloku pomocí rovnice (23). Když budeme uvažovat frekvenci bloku pro každý blok jako fr_i , pak je funkce $f(d^*)$ reprezentována s využitím blokového průměru dle rovnice (24), kde m_i je střední hodnota blokové sekce, fr_i je frekvence bloku a n je celkový počet bloků. Střední hodnota, neboli hodnota páté blokové sekce se vypočítá dle vztahu (25). Střední hodnota a průměrná odchylka se pak společně využijí pro výpočet tří funkcí dle

vztahu (26), kde symbol σ značí průměrnou odchylku a symbol λ znázorňuje počet využitých strojních os. [7, 13]

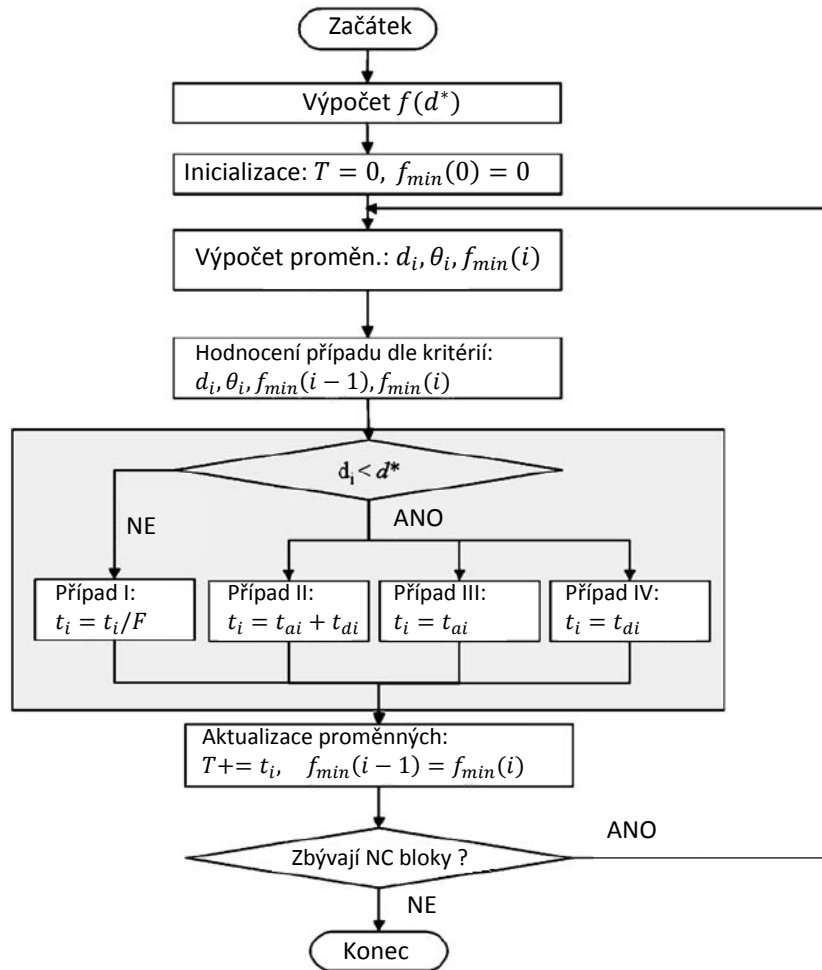
$$f_1(d^*) = m_i \cdot \frac{fr_i}{n} \quad (24)$$

$$f_2(d^*) = m_5 = \frac{d'}{10} \cdot 5 \quad (25)$$

$$f_i(d^*) = f_1(d^*) + \lambda\sigma, \quad i = 3, 4, 5 \dots, \quad \lambda = \{1, 2, 3\} \quad (26)$$

5.3. Model k určení strojního času pomocí distribuce NC bloků

Cílem studie E. Y. Heoa bylo navrhnout cyklický algoritmus určený k výpočtu strojního času pro výše uvedené čtyři typy rychlostí posuvu v blocích. V prvním kroku, potřebným pro výpočet doby obrábění, je důležité získat hodnotu d^* za použití distribuce bloku. Následně v druhém kroku je inicializován minimální posuv $f_{min}(0)$ v počátečním bodě obráběcího procesu a celkový čas obrábění. Další fází je výpočet proměnných veličin, jako je délka bloku d_i , úhel mezi bloky θ_i a minimální posuv $f_{min}(i)$, abychom získaly dobu obrábění aktuálního bloku. Ve čtvrtém kroku se vypočítá strojní čas bloku, v závislosti na typu bloku dle rychlosti posuvu. Předposlední fází je aktualizace celkového času obrábění a minimálního posuvu pro výpočet strojního času dalšího bloku. V posledním kroku se opět ověří, zda neexistuje nějaký zbývající blok pro výpočet a v kladném případě se algoritmus ukončí. Schéma celého algoritmu můžeme vidět na obrázku 10. [13]



Obr. 10: Postup odhadu strojního času při NC obrábění [13]

Aby byl ověřen výpočtový model odhadu doby obrábění, navrženého v tomto experimentu, byly porovnány strojní časy skutečných obrobků, které se zhotovily na CNC stroji, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 1. Pro získání optimální funkce $f(d^*)$, která efektivně odráží distribuci bloku, použitou k odhadu doby obrábění a konstanty zrychlení, popřípadě zpomalení, byl připraven NC program pro obrobení povrchů sedmi reálných obrobků. Použitým CAM softwarem byla CATIA verze 5.8. Jmenovitý čas a skutečný čas obrábění pro těchto sedm různých NC programů jsou shrnuty v tabulce 4. Charakteristiky zrychlení a zpomalení CNC regulátoru výrazně ovlivňují skutečný čas obrábění. Je to zřejmé zejména v případě krátkých NC bloků. Chyba mezi skutečným a jmenovitým strojním časem je významná především pro NC programy, určených například pro výrobu forem na odlitky, které se skládají z mnoha krátkých bloků. Tato chyba odhadu pochází převážně z nepřesného měření minimální rychlosti posuvu regulátoru. V této studii byla navržena metoda, ke snížení chyby

související s odhadem minimálního posuvu, založena na základě charakteristik distribuce NC bloků. Experimentální výsledky naznačují, že odhady doby obrábění můžou být provedeny s přibližně 10 % chybou. [13]

Většina moderních obráběcích center, která se dnes používají, podporují vysokou rychlost posuvu a funkci automatického posuvu při frézování rohů, či uzavřených kapes, což vyžaduje velkou kontrolu zatížení. Tato obráběcí centra mohou poskytnout rychlou akceleraci nebo zpomalení, proto je tedy nutné shromáždit skutečné strojní časy s různými vysokými rychlostmi posuvu, aby mohl být vytvořen přesnější model odhadu. Aby bylo možné navrženou metodu aplikovat na různě geometricky náročné modely, je nezbytné provést ještě další pokusy. [13]

Tabulka 4: Výsledky experimentu E. Y. Heoa znázorňující skutečný a nominální strojní čas [13]

Obrobek	Rychlost posuvu					
	500 mm/min		1000 mm/min		1 500 mm/min	
	Skutečný [s]	Nominální [s]	Skutečný [s]	Nominální [s]	Skutečný [s]	Nominální [s]
1	50.9	50.473	27.967	25.236	22.317	16.824
2	53.65	53.558	29.25	26.779	24.983	17.853
3	69.917	69.758	40.55	34.879	38.717	23.253
4	57.2	57.185	30.3	28.592	24.633	19.062
5	53.117	53.085	27.35	26.543	21.933	17.695
6	80.667	80.263	52.3	40.132	46.883	26.754
7	91.45	91.294	55.933	45.647	50.617	30.431

6. Mechanická metoda pro odhad strojního času

Odhadovaný strojní čas, vyhodnocený CAM softwary, je v drtivé většině případů, z důvodu oscilace rychlosti posuvu, velmi nepřesný. Pokud chceme stanovit celkový strojní čas pomocí analytických výpočtů, nastává pro výrobce CNC strojů velmi náročný proces, neboť software musí shromáždit obrovské množství dat, definující aktuální stav obráběcího stroje. Tato získaná data nás informují například o profilech zrychlení a zpomalení, o tom jak dlouho budou zpracovávány bloky programu a nebo jaké je omezení jerků. Analytická metoda je dále závislá na způsobu implementace dat do řídicího systému stroje (přesnost pohybu, polohová přesnost a další nastavení stroje). Na rozdíl od analytického přístupu se mechanická metoda výpočtu strojního času více přibližuje reálným hodnotám. Čas obrábění je stanoven s ohledem na konfiguraci CNC stroje pro NC program, vygenerovaný jakýmkoli CAM softwarem. [6]

6.1. Čas odezvy stroje (MRT)

Čas odezvy stroje, neboli MRT (Machine Response Time) je výkonnostní funkce pro jakékoli provedení CNC stroje, která je následně využívána pro stanovení strojního času, pomocí specifického softwaru, při frézování složitých tvarů, v závislosti na potenciálu daného stroje. MRT se získává pomocí několika na sebe navazujících experimentů, které se zpracují systémem daného stroje a které jsou doprovázeny jednoduchými matematickými výpočty. Tato proměnná veličina charakterizuje CNC stroj v souvislosti s jeho pohybovými schopnostmi na složité dráze při vysoké rychlosti posuvu. Z tohoto důvodu byl vyvinut na první pohled jednoduchý software, který na rozdíl od komerčních CAM softwarů mnohem přesněji vyhodnotí čas obrábění. [6]

6.2. Princip stanovení MRT

Pro určení odezvy stroje se v první fázi na konkrétním stroji spustí několik experimentálních NC programů, které jsou založené na malých lineárních pohybech, definovaných funkcí G01, při nastavené určité rychlosti posuvu. Nástroj by se měl pohybovat v přímočaré trajektorii, o zvolené délce například 300 mm, která je tvořena počtem malých přírůstků, které jsou velké zhruba 0,1 milimetru. Hodnota rychlosti posuvu se volí vysoká, zhruba 5 000 milimetrů za minutu. Obecně však stroj není

schopný při takto malých délkách segmentů jet uvedenou posuvovou rychlostí. Tento pohyb, skládající se z velkého počtu malých segmentů je typickým pro frézování geometricky složitého povrchu. Výše uvedené hodnoty řezných podmínek byly určeny pro experiment na konkrétních CNC obráběcích strojích, jak je uvedeno v článku *Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate*. Při spuštění daného programu se musí na monitoru stroje pozorovat skutečná rychlost posuvu, která se nerovná maximální nastavené hodnotě, ale ve skutečnosti je proměnná v čase. Tato hodnota posuvu je konstantní vzhledem ke stejné délce segmentů. Touto hodnotou posuvu se pak vydělí délka segmentu, čímž získáváme vztah pro požadovaný MRT v jednotkách milisekund. [6]

$$MRT [ms] = \frac{s_i [mm]}{f_p [mm/min]} \cdot 60\,000 \quad (27)$$

MRT je udržováno konstantní a lze ho považovat za nástrojovou charakteristiku a použít ho k předvídání výkonu při obrábění. Čas odezvy stroje nám dále znázorňuje omezení pohybu stroje při vysoké rychlosti posuvu, při uvažování dráhy nástroje, složené z malých přímých čar. Čím více je zakřivení geometrie povrchu součásti složitější, tím menší musí být délka segmentu pro konkrétní toleranční pásmo. Trajektorie nástroje může ovlivnit délku segmentů v důsledku matematické algoritmu pro výpočet dráhy nástroje, avšak vzhledem k složitému povrchu součásti je malá délka segmentu nezávislou vlastností na kvalitě algoritmu. Tato metoda rozpozná MRT pouze pro frézování tříosých strojů a tedy ji zatím nelze použít pro víceosé stroje. [6]

6.3. Výpočet skutečného času obrábění pomocí MRT

Pomocí získaného MRT z libovolného testovaného CNC stroje se vypočítá, s ohledem na oscilace posuvu, strojní čas. Pro proces výpočtů níže popisovaného experimentu byl použit software vyvinutý ve společnosti Delphi. Pokud je znám MRT daného konkrétního stroje, software využije NC program vygenerovaný jakýmkoli CAM softwarem. Z bodů tohoto NC programu software získá jednotlivé délky segmentů podél trajektorie nástroje s ohledem na po sobě jdoucí přírůstky v jednom, dvou či třírozměrném prostoru dle typu obrábění. Software následně vypočítá maximální rychlost posuvu v každém tomto segmentu, s ohledem na jeho délku, v závislosti na

výkonu stroje vyhodnoceného skrze MRT. Poté se provede porovnání maximálních přírůstkových rychlostí posuvu s posuvy naprogramovanými. Software přepočítá inkrementální posuv a použije menší nebo rovnocenný než je ten naprogramovaný, za účelem výpočtu doby obrábění pro každý tento segment. Součet veškerého času potřebného k obrábění v každém segmentu je generován softwarem jako strojní čas, který je svou hodnotou blízký ke skutečnému času obrábění. [6]

Navrhovaný algoritmus je schopen vypočítat dobu obrábění pouze pro lineární dráhy nástrojů, tedy pohyby definované v ISO kódu funkcí G01. Tato metoda je používána celosvětově zejména v odvětví tváření, pro výrobu zápustek, protože představuje jednoduchý způsob propojení softwaru CAM s CNC stroji. Jelikož neexistuje matematická standardizace takzvaného spline polynomu pro popis cesty nástroje při obrábění složitého tvaru, tak navrhovaný software nepředvídá pro takovéto NC programy dobu obrábění. To platí i pro NC programy založené na kruhových interpolacích, zastoupené funkcemi G02 a G03. Kruhová interpolace má typická omezení na rovinné pohyby, proto se nepoužívá pro frézování těchto tvarů, které často vyžadují pohyby ve třech osách. [6]

6.4. Použití mechanické metody v praxi

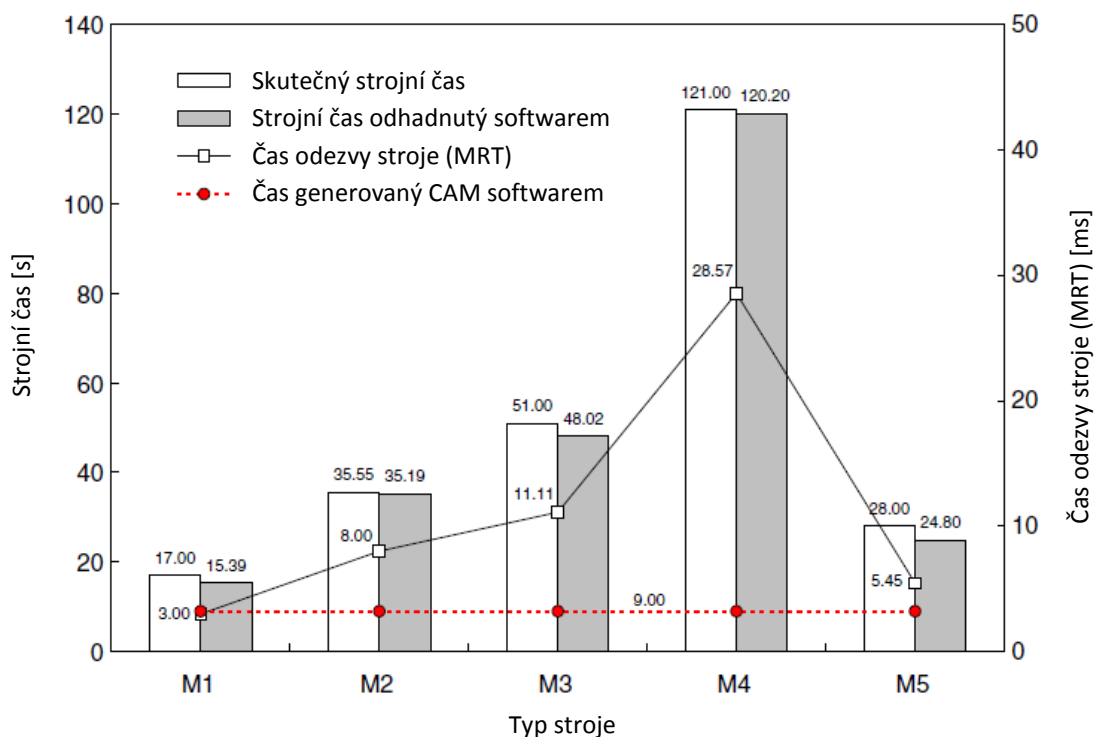
Pro dokázání platnosti výpočtu, získaného pomocí uváděného softwaru, byl dle článku *Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate* proveden experiment, založený na jednoduchém NC programu. Tento experiment byl uskutečněn celkem na pěti různých konfiguracích klasických i vysokorychlostních CNC obráběcích strojů, uvedených v tabulce 5. Pro získání MRT, musí být program založený na lineárních interpolacích, definovaných funkcí G01, při užití velikosti bloku 0,1 milimetrů. Program se zrealizoval za použití jednoosého, dvouosého i tříosého způsobu frézování a byly použity různé přírůstky délky dráhy (0,05 a 0,2 milimetrů). Zároveň byly během každého experimentu, pro všechny stroje, spuštěny specifické funkce, jako například zmiňovaná funkce Look-Ahead. [6]

Tabulka 5: CNC obráběcí stroje použité při experimentu [6]

Obráběcí stroj	Klasifikace	Otáčky vřetena [ot/min]	Max. rychlost posuvu [mm/min]	Získané MRT [ms]
M1	HSC	24 000	35 000	3,0
M2	HSC	18 000	22 000	8,0
M3	Konvenční	10 000	5 000	11,1
M4	Konvenční	6 000	5 000	28,57
M5	HSC	18 000	22 000	5,45

Aby bylo možné vyhodnotit strojní čas odhadovaný softwarem, byla vypočtena trajektorie nástroje pomocí CAM softwaru Powermill 7.0 v tolerančním pásmu 0,01 milimetrů. V první fázi tohoto experimentu byla sledována na obrazovce CNC obráběcího stroje maximální rychlost posuvu lineárních pohybů definovaných NC programem, jednotlivě na každém stroji. Během pozorování nedosáhl ani jeden z testovaných strojů naprogramované hodnoty rychlosti posuvu, která činila 5 000 milimetrů za minutu. Vzhledem k tomu, že délka segmentu byla konstantní, mohla být i rychlost posuvu udržována na konstantní hodnotě až do samotného konce NC programu. V závislosti na výkonu stroje dosáhla maximální rychlost posuvu, při délce bloku 0,1 milimetru, specifické hodnoty. V lineární dráze všechny stroje snížily, pouze za pohybu jedné strojní osy, svou rychlost posuvu. Proto v tomto případě můžeme konstatovat, že důležitým faktorem pro omezení rychlosti posuvu je regulační smyčka, zatímco kinematika samotného stroje nemá až takový vliv. Regulační smyčky nám obecně umožňují korektní řízení servopohonů. Běžný regulátor pro servopohony obsahuje tři regulační smyčky. První je regulační smyčka polohová, která vyhodnotí rozdíl mezi skutečnou a žádanou polohou nástroje a tím řídí pohyb strojní osy. Další je rychlostní regulační smyčka. Ta nám slouží k řízení rychlosti vzhledem k setrvačným účinkům pohybujících se hmot. Jelikož tyto pohybující se hmoty nemůžeme zastavit naráz v jednom okamžiku, musím dle velikosti polohové odchylky regulovat jejich rychlost posuvu tak, aby suport dojel do koncového bodu bloku téměř nulovou rychlostí. Poslední běžnou regulační smyčkou je smyčka proudová, která reguluje elektrický proud, tekoucí do motoru a tím řídí jeho točivý moment a rychlé reakce servopohonů. [6, 9]

Maximální rychlost posuvu je přímo spojena s nastavenou technologií CNC obráběcích strojů. Nejlepší výkony byly pozorovány na vysokorychlostních strojích, avšak i u nich byla skutečná rychlost posuvu udržována na hodnotě menší, než polovina hodnoty naprogramované. Počet strojních os v pohybu nemá vliv na výkon žádného testovaného stroje. Maximální hodnota posuvu byla pro všechny případy stejná. Další experimenty byly prováděny při změnách délek segmentu při hodnotách 0,05, 0,1 a také při 0,2 milimetrů. S použitím rovnice (27) lze skutečnou rychlost posuvu f_p získat pro libovolnou délku segmentu pro jakýkoli testovaný stroj. Vzhledem k tomu, že rychlost posuvu a délka segmentu jsou si přímo úměrné, můžeme čas odezvy stroje brát jako konstantní charakteristiku stroje. Na základě tohoto zjištění byla použita rovnice (27) k získání MRT pro každý testovaný stroj. Hodnoty MRT jsou vypsány v tabulce 5. Když byla identifikována doba odezvy pro každý stroj, bylo nutné v další fázi ověřit vyvinutý software, určený k předvídání strojního času v závislosti na výkonu stroje. Pro jednu konkrétní cestu nástroje, při obrábění zkušebního vzorku, CAM software odhadl čas obrábění na 9,0 sekund, zatímco strojní čas odhadovaný navrženým softwarem byl blíže skutečné době obrábění. Celkové výsledky pak můžeme vidět na obrázku 11. [6]



Obr. 11: Vykreslení strojního času odhadnutého dle navržené metody [6]

Jak plyne z výše uvedeného grafu, tak opravdu významné rozdíly můžeme zaznamenat mezi skutečnou dobou obrábění a časem vygenerovaným CAM softwarem. Vedle toho je postaven strojní čas, odhadovaný navrženou metodou, který nám dává mnohem přesnější výsledky. Příkladem může být čtvrtý testovaný stroj (M4), u kterého byla s využitím softwaru konečná chyba 0,67 %, zatímco odhad pomocí CAMu vytvoří chybu 1,24 %. Nejnižší odchylky bylo při odhadu navrženou metodou docíleno u stroje M1 a naopak nejvyšší odchylka byla zaznamenána u stroje M5, která byla vůči skutečné hodnotě téměř 12 %. Nicméně CAM software v tomto experimentu vygeneruje konečnou hodnotu s chybou 211 % od skutečné hodnoty. Proto můžeme časovou chybu od navrženého softwaru považovat za nevýznamnou ve srovnání s odhadem, provedeným CAM softwarem, a lze říci, že je způsobená různorodou charakteristikou stroje, která je zastoupena například profilem zrychlení a zpomalení, změnou směru cesty nástroje a dalšími vlastnostmi, složitých na výpočet. V tabulce 6 jsou uvedeny výsledky praktického experimentu konkrétní součásti, (formy pro vstřikování polymerů), které nám ukazují, že skutečná doba obrábění byla o 157 % delší, než čas, odhadovaný CAM softwarem, zatímco navrhovaný algoritmus dosahuje v čase obrábění chyby pouze 0,3 %. [6]

Na základě tohoto experimentu, uveřejněného v článku *Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate* můžeme tedy navrhovaný software, společně s mechanickou metodou, vyhodnotit jako prospěšnou a použitelnou metodu pro získávání skutečného strojního času a to s vysokoprocenní spolehlivostí.

Tabulka 6: Výsledky praktického experimentu [6]

MRT získané na CNC stroji	Skutečný strojní čas	Čas odhadovaný CAM softwarem	Odhadovaný čas navrženým softwarem
28 ms	754 s	293 s	756 s

7. Vyhodnocení a využití poznatků pro vlastní experiment

Pro ověření zjištěných dat, z níže uvedených zdrojů, jsem provedl vlastní experiment založený na teoretických znalostech z předešlé části práce. V teoretické části jsem se věnoval zejména vlivům kolísání rychlosti posuvu, tedy změnám této rychlosti vůči nastavené hodnotě a to jednotlivě v průběhu každého bloku. V prvním vlastním experimentu se proto zaměřím na průběh rychlosti pohonů s pomocí jednoduchých NC programů. Jak bylo zmíněno již v teoretické části práce, tak k největším změnám rychlosti posuvu dochází na začátku a konci každého bloku, kdy se projevují vlivy zrychlení pohonů. Zde se ale objevuje stěžejní problém, neboť CAM softwary při výpočtu strojního času zrychlení vůbec neuvažují. Software CAM totiž vyhodnotí, že daný pohyb v rámci jednoho bloku má celou dobu konstantní rychlost, přičemž pro výpočet využívá obecně známého vztahu (28). Ve skutečnosti jsou tu však časové prodlevy potřebné k zrychlovacímu a zpomalovacímu procesu pohonů. Tento rozdíl mezi průběhy pohybu je patrný na grafickém znázornění v obrázku 12. Ani ten však nezobrazuje skutečný průběh této veličiny. Oblast pro nárůst rychlosti, jež přechází do konstantní funkce, má ve skutečnosti tvar S křivky, avšak pro zjednodušení, lze tento průběh nahradit lineární funkcí. Kolísání rychlosti posuvu ve střední části dlouhých bloků, které je způsobeno spíše vnějšími vlivy, jako je například odpor materiálu při řezu, v tomto experimentu není zahrnuto.

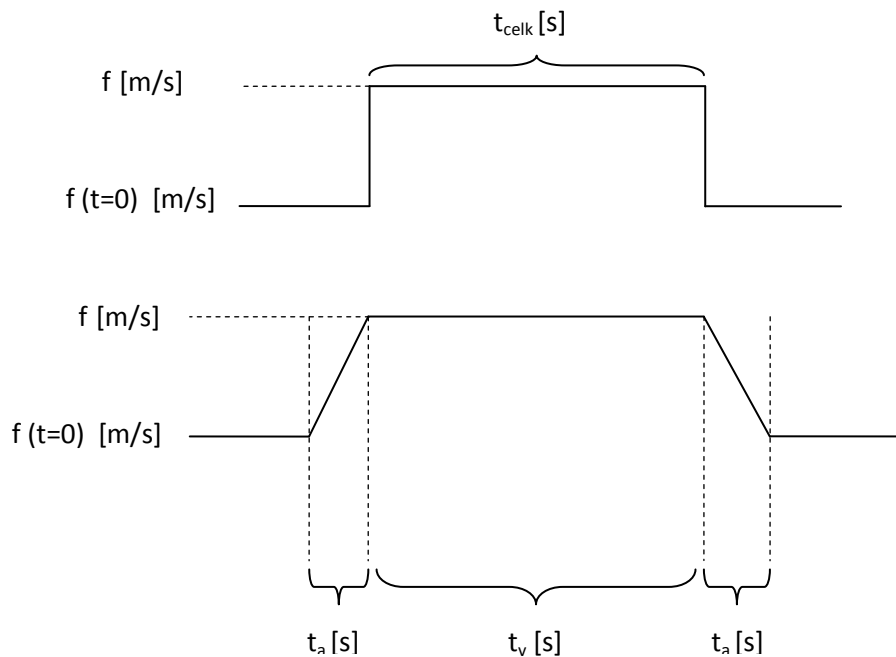
Problém nastává i s kinematickými vlastnostmi rychloposuvu, jelikož nelze do každého CAM softwaru zadat jeho hodnotu. I přesto že je hodnota rychlosti rychloposuvu, u drtivé většiny CNC strojů, dána výrobcem, tak CAM vnímá rychlost posuvu jako nekonečnou, například v případech přejezdů nástroje, a tím vnikají další rozdíly od skutečného strojního času.

$$t = \frac{s}{f_{max}} \quad (28)$$

V souvislosti s akceleračními účinky vzniká další problém v souvislosti s obráběním krátkých bloků. Vzhledem k velmi malé velikosti dráhy pohon často ani nestačí zrychlit na nastavenou rychlost posuvu a následně již musí opět brzdit. V těchto NC programech, založených na krátkých blocích, vznikají největší časové prodlevy. Velikost chyby samozřejmě narůstá s počtem řádků programu. Proto dalším cílem

prvního experimentu je vyhodnocení, jak velký vliv má dělení trajektorie na krátké bloky na celkovém strojním čase.

Další parametr, ovlivňující strojní čas, který byl v první části práce zkoumán, byl úhel mezi drahami bloků NC programu. Při změně tohoto úhlu dochází k propojení pohybů dvou a více pohonů, v závislosti na typu programování (2D, 3D). To samozřejmě způsobuje další časové odchylky. Cílem tohoto experimentu bude zjistit, na základě experimentu pana E. Y. Heoa, jaký úhel, svíraný dráhami dvou sousedních bloků, má největší vliv na nežádoucí změny strojního času.



Obr. 12: Model průběhu rychlosti posuvu využívaný CAM softwary a skutečný model

7.1. Analýza strojního času dle průběhu rychlosti posuvu

Na základě zjištěných poznatků jsem provedl vlastní praktický experiment založený na jednoduchých NC programech realizovaných na CNC frézce FC 22 CNC v laboratořích ČVUT, fakulty strojní. Veškeré prováděné experimenty jsou pro ulehčení a rozsah práce omezeny pouze na 2D interpolaci. V případě 3D interpolace je předpokládáno, že platí stejné provozní podmínky jen s tím rozdílem, že je nutné připočítat případnou chybu interpolace a polohování pro třetí použitou osu.

Tabulka 7: Vybrané parametry CNC frézky FC 22 CNC použité pro vlastní experiment

pracovní zdvih os X Y Z	450 x 220 x 320	mm
výkon motoru vřetene	2,2	kW
rychlost posuvu	0 - 6 000	mm/min
opakovaná přesnost polohování	0,005	mm
řídící systém	MIKROPROG F	

Jelikož výrobci CNC strojů obvykle neuvádějí hodnoty zrychlení jednotlivých pohonů, ačkoli je to jeden ze strojů zadaných parametrů, bylo nutné si tuto veličinu pro následné výpočty zjistit. Prvním experimentem je založen na jedné lineární dráze dlouhé 450 milimetrů. Pomocí elektronického akcelerometru SONY Z1-C, s frekvencí vzorkování 120 Hz a s rozlišením 0,01 m/s², upnutého ve strojním svěráku na stole frézky, a aplikace Physics Toolbox jsem získal průběhy zrychlení, pro tři zvolené rychlosti posuvu, které můžeme vidět v níže uvedených grafech. Před samotným experimentem jsem ještě provedl vstupní měření pro tři různé polohy přístroje, kterým jsem prokázal, že naměřená hodnota je pro tyto dané polohy vždy stejná.

$$t_a = \frac{f}{a} \quad (29)$$

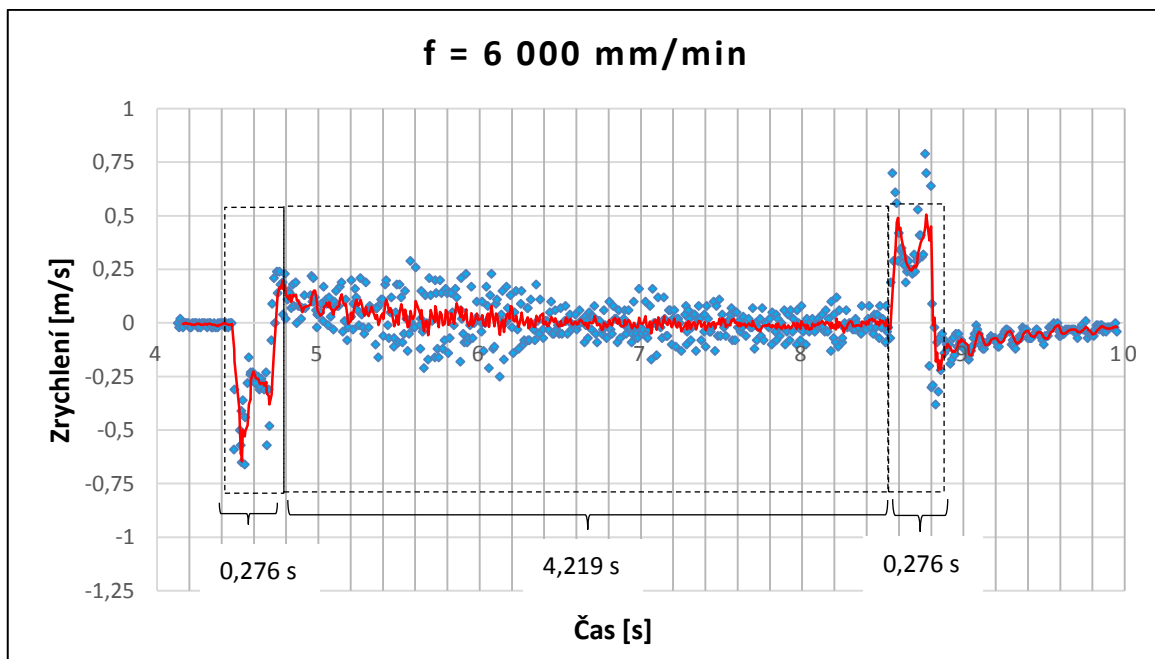
$$s_a = \frac{1}{2} a \cdot t_1^2 \quad (30)$$

$$t_f = \frac{s_{celk} - 2 \cdot s_a}{f} \quad (31)$$

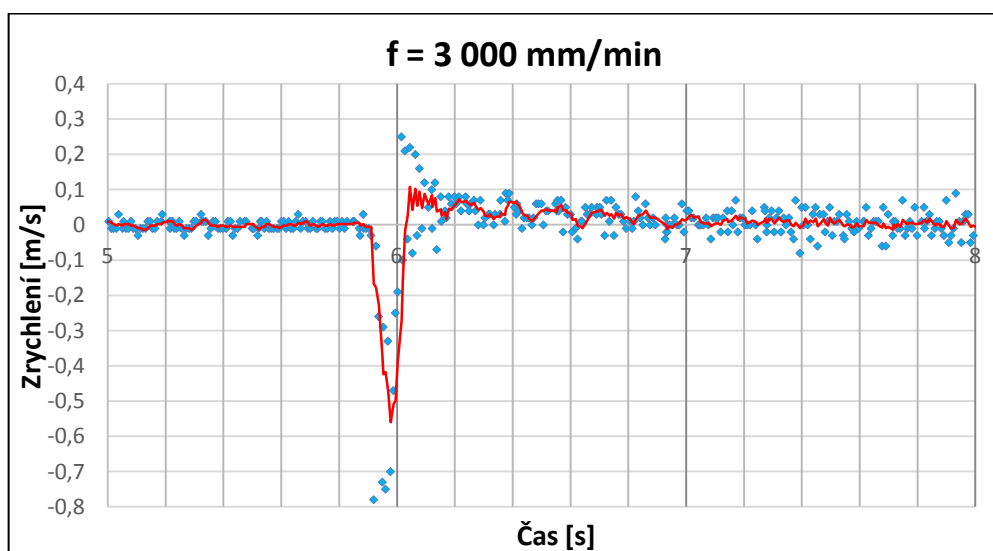
$$t_{celk} = 2 \cdot t_a + t_f \quad (32)$$

Z grafů jsou patrné úseky pro rozběh a doběh pohonu, z kterého jsem na základě střední hodnoty určil zrychlení daného pohonu, které se přibližně rovná 0,4 m/s². Ze zjištěné hodnoty zrychlení, jsem poté mohl na základě určené rychlosti posuvu vypočítat dle vztahu (29) čas, potřebný pro rozjezd i zastavení pohonu, neboť tyto dvě hodnoty jsou si rovny. Pokud mi byl znám čas pro zrychlení, mohl jsem vypočítat dráhu pro zrychlení dle vztahu (30). Rozdíl celkové dráhy a dvojnásobku dráhy pro zrychlení jsem použil pro výpočet času, při kterém pohon jede konstantní rychlostí a který je definován vztahem (31). Součet těchto vypočtených dílčích časů, nám dle rovnice (32) poté dá celkový strojní čas tohoto lineárního úseku, který

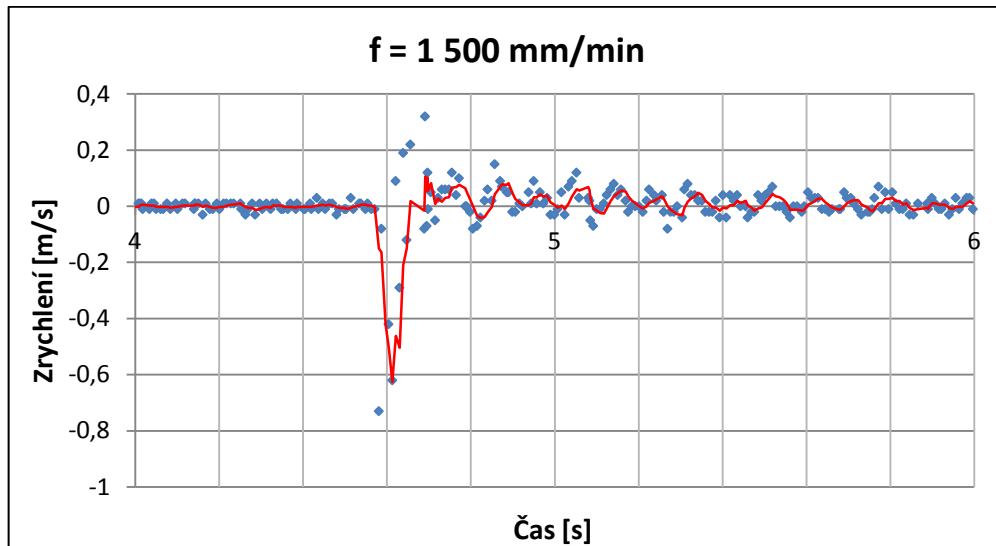
můžeme vidět, pro jednotlivé rychlosti posuvu, v tabulce 8. Pro porovnání je v tabulce uveden i přibližný odečet času pro zrychlení z níže uvedených grafů. Na obrázku 13 jsem dále znázornil úsek rozjezdu a dojezdu pohonu a mezi nimi úsek s konstantní rychlostí.



Obr. 13: Průběh zrychlení osy X při posuvu 6 000 mm/min



Obr. 14: Průběh zrychlení při rozjezdu osy X při posuvu 3 000 mm/min



Obr. 15: Průběh zrychlení rozjezdu osy X při rychlosti posuvu 1 500 mm/min

Z níže uvedených výsledků je patrné, že se zvyšující se rychlostí posuvu se značně zvyšuje i chyba celkového strojního času, která při dráze 450 mm, při maximální rychlosti posuvu 6 000 mm/min činila 0,25 s. Což je chyba přibližně 5,55 %. V praxi by takováto chyba asi neměla příliš velký význam, nicméně u dlouhých programů o velkém počtu řádků by se tato chyba pochopitelně navyšovala až do řádů minut, což už má z hlediska ekonomického i časového zásadní význam.

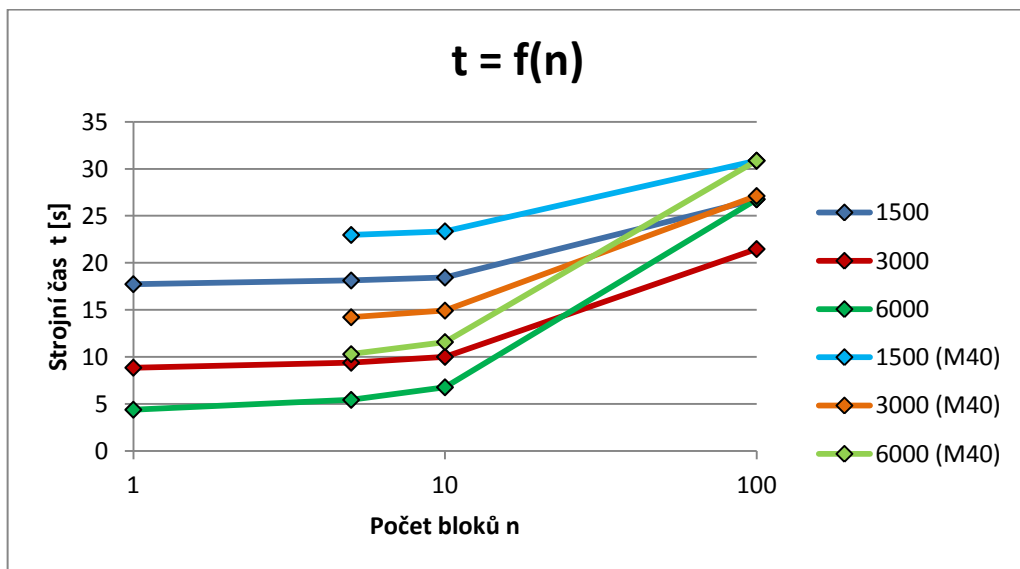
Tabulka 8: Výsledky prvního experimentu

Celková délka dráhy	s_{celk} [m]	0,45		
Odečtená hodnota zrychlení	a [m/s^2]	0,4		
Naprogramovaná rychlost posuvu	f [m/s]	0,1	0,05	0,025
Celkový strojní čas vyhodnocený CAM	t_{celk} [s]	4,5	9	18
Čas pro zrychlení/zpomalení	t_a [s]	0,25	0,125	0,062
Čas pro zrychlení/zpomalení (z grafu)	t_a [s]	0,269	0,134	0,069
Dráha pro zrychlení/zpomalení	s_a [m]	0,0125	0,003	0,001
Dráha při konstantní rychlosti	s_v [m]	0,425	0,443	0,448
Čas pro úsek s konstantní rychlostí	t_v [s]	4,25	8,875	17,937
Celkový strojní čas	t_{celk} [s]	4,75	9,125	18,062

Dalším krokem tohoto experimentu bylo určit velikost vlivu krátkých bloků. Program tvořily dvě lineární dráhy o délce 450 mm (pohyb vpřed a zpět), které jsem postupně rozdělil na 5, 10 a 100 segmentů. Měření jsem provedl opět pro tři hodnoty rychlosti posuvu. Z důvodu navazování bloků jsem při tomto experimentu musel brát v

úvahu i použití funkce M40. Tato funkce nám umožňuje kontinuální navazování jednotlivých bloků, které se uplatňuje zejména při obrábění geometricky složitých ploch. V opačném případě je použita funkce M41, která ruší vlastnosti funkce M40 a bloky na sebe navazují skokově, trhavými pohyby, a dochází k prodlužování strojního času.

V následujících tabulkách můžeme vidět výsledky celého experimentu. Opět se samozřejmě potvrzuje skutečnost, že s vyššími rychlostmi posuvu se zvyšuje rozdíl mezi skutečným a vypočteným časem. Dále je patrné, že časový rozdíl se, při zvyšujícím se počtu segmentů lineární dráhy, také výrazně zvyšuje. Při rozdělení dráhy na 100 bloků a maximální posuvové rychlosti 6 000 mm/min byla naměřena doba obrábění 26,766 sekund, což je rozdíl 36 % oproti hodnotě vypočítané z teoretického vzorce.



Obr. 16: Závislost počtu na sebe navazujících se bloků na strojním čase

Zajímavostí tohoto měření byly výsledky naměřené u NC programů s využitím funkce M40, kdy byl zaznamenán vyšší strojní čas, než u nespojitého navazování bloků. Důvod se skrývá v samotné podstatě využití této funkce. Funkce M40 má největší význam při obrábění velice krátkých bloků, v řádu desetin až setin milimetru, a při použití obvyklých posuvových rychlostí, cca do 1000 mm/min, kdy skutečně poté kontinuální navazování bloků plní svou funkci, která má za následek výrazné snížení celkového strojního času. Vzhledem k tomu, že v tomto experimentu byly použity velké délky segmentů a velké posuvové rychlosti, tak funkce M40 neměla pro toto měření význam.

Tabulka 9: Strojní čas pro krátké bloky při rychlosti 1 500 mm/min

Počet bloků	Délka bloků [mm]	Použití funkce M40	Rychlost posuvu [mm/min]			
			1 500			
			Skutečný čas [s]	Čas získaný z grafu [s]	Vypočítaný čas se zrychlením [s]	Vypočítaný čas bez zrychlení [s]
1	450	X	17,735	17,599	18,063	18
5	90	NE	18,125	18,136		
		ANO	22,969	22,980		
10	45	NE	18,438	X		
		ANO	23,352			
100	4,5	NE	26,766	X		
		ANO	30,868			

Tabulka 10: Strojní čas pro krátké bloky při rychlosti 3 000 mm/min

Počet bloků	Délka bloků [mm]	Použití funkce M40	Rychlost posuvu [mm/min]			
			3 000			
			Skutečný čas [s]	Čas získaný z grafu [s]	Vypočítaný čas se zrychlením [s]	Vypočítaný čas bez zrychlení [s]
1	450	X	8,852	8,884	9,125	9
5	90	NE	9,375	9,443		
		ANO	14,219	14,318		
10	45	NE	10	X		
		ANO	14,922			
100	4,5	NE	21,469	X		
		ANO	27,110			

Tabulka 11: Strojní čas pro krátké bloky při rychlosti 6 000 mm/min

Počet bloků	Délka bloku [mm]	Použití funkce M40	Rychlost posuvu [mm/min]			
			6 000			
			Skutečný čas [s]	Čas získaný z grafu [s]	Vypočítaný čas se zrychlením [s]	Vypočítaný čas bez zrychlení [s]
1	450	X	4,383	4,445	4,75	4,5
5	90	NE	5,430	5,470		
		ANO	10,289	10,380		
10	45	NE	6,766	X		
		ANO	11,576			
100	4,5	NE	26,766	X		
		ANO	30,868			

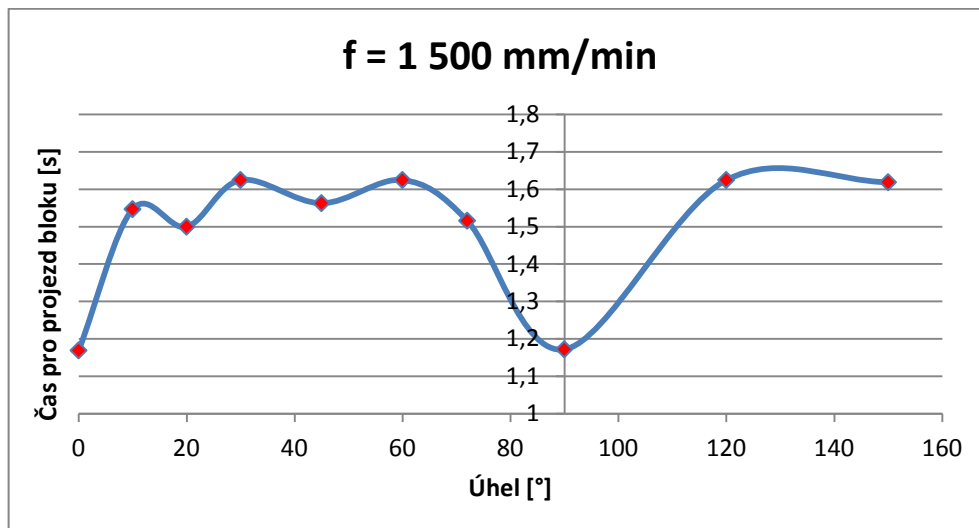
7.2. Analýza strojního času v závislosti na úhlu mezi drahami sousedních bloků

V druhém experimentu jsem zkoumal závislost úhlu, svíraného dráhami dvou sousedních bloků, na celkovém strojním čase. Pokus tvořilo 9 NC programů skládajících se ze dvou bloků délky 100 mm. Byl tedy zachován pro všechny programy stejný počet bloků o stejné délce dráhy, čímž se jedinou proměnnou stal úhel, svíraný mezi těmito drahami. Měření bylo provedeno opět pro tři hodnoty rychlosti posuvu. Naměřené výsledky jsem zanesl do tabulky 12 a graficky znázornil v níže uvedených grafech.

Tabulka 12: Vyhodnocení strojního času v závislosti na úhlu mezi drahami sousedních bloků

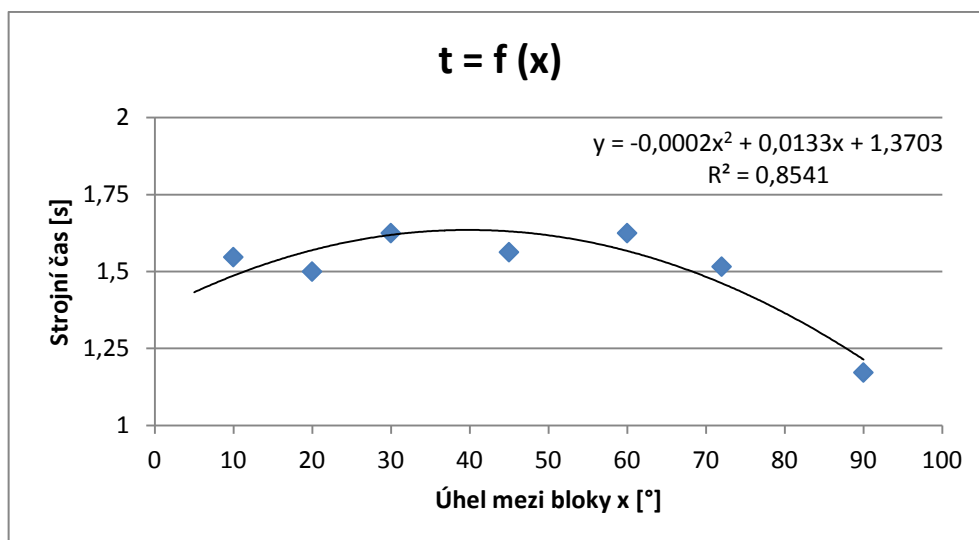
Úhel [°]	Rychlost posuvu [mm/min]					
	6 000		3 000		1 500	
	Skutečný čas [s]	Vypočítaný čas [s]	Skutečný čas [s]	Vypočítaný čas [s]	Skutečný čas [s]	Vypočítaný čas [s]
10	2,735	2	4,506	4	8,36	8
20	2,678		4,421		8,157	
30	3,219		5,047		8,593	
45	2,735		4,516		8,359	
60	2,813		4,64		8,578	
72	2,703		4,437		8,204	
90	2,344		4,141		8	
120	2,797		4,857		8,593	
150	2,797		4,857		8,593	

V prvním grafu můžeme vidět vliv jednotlivých úhlu, které svírá dráha daného bloku se základnou, na čase, potřebném pro projetí tohoto bloku. Na základě toho pak mohu potvrdit tvrzení pana E. Y. Heoa, který ve své studii uvádí, že nejmenšího strojního času lze docílit při úhlu 90°. Stejně jako při lineární interpolaci dvou na sebe navazujících bloků v jedné přímce, tedy při nulovém úhlu mezi jejich drahami, je i při 90° úhlu v činnosti pouze jeden pohon. V ostatních případech dochází ke koordinaci pohybů dvou pohonů, v případě 2D frézování, čímž vzniká větší chyba polohování a tím i větší chyba časová. Jak můžeme vidět, tak největší chyby se pohony dopustili při úhlu 30°, kde chyba dosahovala 50 % od hodnoty vypočítané CAM softwarem.



Obr. 17: Závislost úhlu mezi základnou a dráhou bloku na strojním čase

V druhém grafu jsem pak pomocí regresní křivky vytvořil, na základě hodnot celkových časů všech 9 NC programů, opravný vztah, kde proměnnou je zmiňovaný úhel, pro přepočít vypočtených hodnot času. Uvedený vztah pro korekci času zahrnuje jak vliv zrychlovacích a zpomalovacích účinků pohonů, tak vliv úhlu mezi bloky. Při součtu těchto dvou faktorů vznikla celková chyba, v závislosti na velikosti tohoto úhlu, která v průměru dosahovala velikosti 50,7 %. V souvislosti s tím, jsem stanovil opravný vztah, s pomocí něhož jsem přepočítal naměřené hodnoty. Po odečtení chyby 50,7 % od průměrné přepočítané chyby, jsem se dostal ke konečnému výsledku, že kompenzační vztah přepočítá hodnotu vygenerovanou CAM softwarem přibližně se 13,5 % chybou, jak je uvedeno ve vztahu (33).



Obr. 18: Kompenzace vypočteného strojního času pomocí rovnice regrese

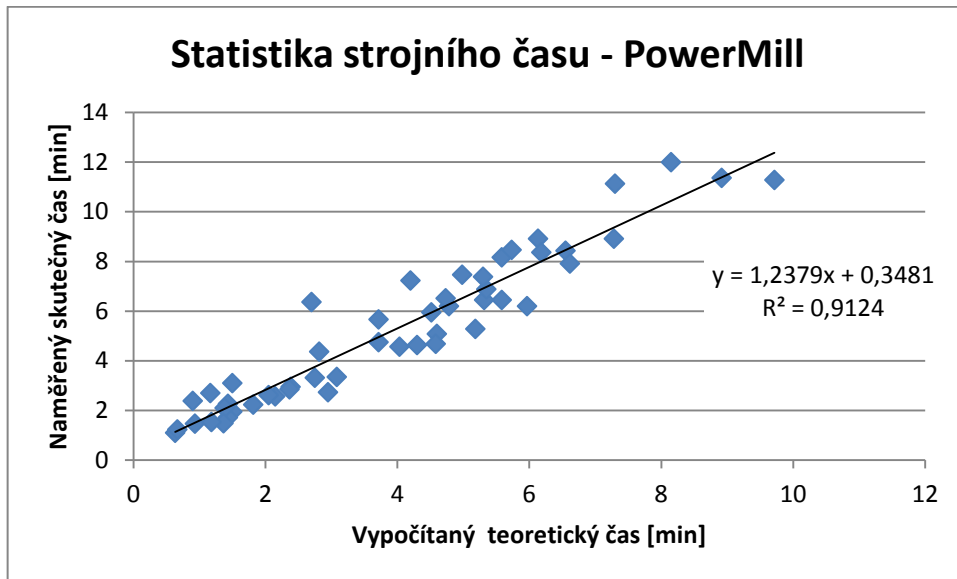
$$chyba [\%] = \left(\frac{t_{\text{přepočítané}}}{t_{\text{naměřené CAM}}} - 1 \right) * 100 - 50,7 \% \quad (33)$$

7.3. Statistická analýza strojního času

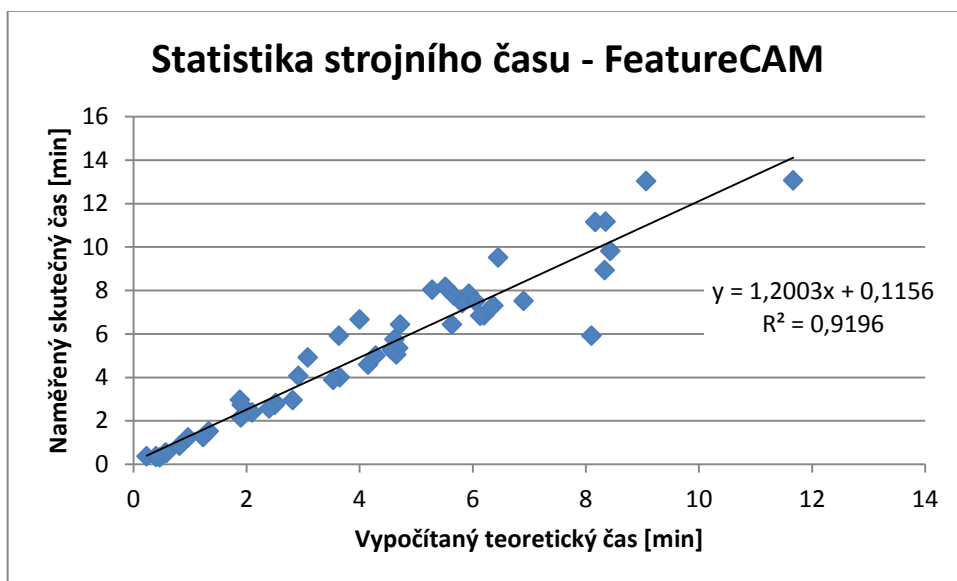
Jelikož hlavní myšlenka této práce se opírá o rozdíly strojního času mezi hodnotami generovanými CAM softwary a skutečnými naměřenými hodnotami, zpracoval jsem v rámci praktického experimentu data, poskytnutá vedoucím práce, která obsahují strojní časy pro 100 různých NC programů skutečných součástí, za použití dvou vybraných CAM softwarů PowerMill a FeatureCAM. Vybraná data se týkají NC programů se vzájemně se podobajícími vlastnostmi. Na všech modelech, o velikosti zhruba 100 x 100 x 100 milimetrů, se provádělo pouze 3D frézování s rozsahem rychlosti posuvu od 750 do 1 200 mm/min.

V disertační práci *Využití CL-dat při tvorbě NC programů*, Ing. Jan Tomíček Ph.D. jsem se inspiroval způsobem vyhodnocení těchto dat. Z mnou vybraných hodnot se časy z CAM softwaru lišily od skutečných časů v průměru o 25 % při použití PowerMill a v průměru o 14 % při použití FeatureCAM. Všechny tyto hodnoty jsem jednotlivě pro oba CAM softwary zanesl do bodového grafu. Z rozložení hodnot je patrné, že graf připomíná lineární funkci. Použil jsem tedy lineární regresi, dle rovnice (34), pro odhad opravných koeficientů, s jejichž použitím bych provedl přepočet vygenerovaných hodnot, vypočítaných na základě vztahu (28), který by se více přiblížil skutečnému strojnímu času.

$$t_{\text{přepočítaný}} = A \cdot t_{\text{vypočítaný}} + B \quad (34)$$



Obr. 19: Vyhodnocení opravného koeficientu pro CAM software PowerMill



Obr. 20: Vyhodnocení opravného koeficientu pro CAM software FeatureCAM

Z výše uvedených grafů nám na základě regrese vyplynuly dvě různé rovnice pro přepočítání časů, v závislosti na použitém CAM softwaru, se spolehlivostí přes 90 %. Je patrné, že rovnice nelze obecně použít pro jakýkoli program, neboť například při teoreticky nulovém čase NC programu by se vypočítaný čas rovnal hodnotě konstanty B. Po přepočítání vybraných hodnot, nalezenými koeficienty, rozdíl mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami klesl v průměru na hodnotu 4,7 %.

Tabulka 13: Vyhodnocení statistického modelu pro přepočítání strojního času generovaného CAM

	PowerMill	FeatureCAM
Průměrná chyba od skutečného času [%]	24,86	13,74
Průměrná chyba při přepočtu nalezenými koeficienty [%]	4,73	4,67

Přepočítané hodnoty nám samozřejmě nedávají skutečný naměřený čas, ale výrazně se jimi přibližujeme reálné hodnotě při velké spolehlivosti výsledku. Abychom se zase více přiblížili realitě, museli bychom do vzorce zahrnout aktuální rychlosti posuvu v každém bloku. Pokud bychom použili určitou funkci, která by zaznamenávala průběh aktuální posuvové rychlosti v čase, jednotlivě v každém bloku, a stanovili z těchto hodnot průměrnou rychlost posuvu pro každý blok, mohli bychom se poté zase o něco více přiblížit skutečné hodnotě za použití vzorce (35).

$$t_{skut} = \sum_{i=1}^n A \cdot \frac{s_i}{\bar{f}_i} + B + n \cdot t_{prog} \quad (35)$$

skutečný strojní čas	t_{skut}	[s]
opravné koeficienty	A, B	[1]
délka dráhy bloku	s_i	[m]
průměrná rychlost posuvu v bloku	\bar{f}_i	[m/s]
počet řádků programu	n	[1]
čas pro načtení řádku programu	t_{prog}	[s]

Na základě této statistické analýzy jsme tedy schopni přibližně určit skutečný čas obrábění. Vyšší přesnosti bychom pochopitelně dosáhli při zahrnutí mnohem vyššího počtu dat z řady dalších NC programů. Pokud bychom pro výše uvedené grafy využili vyšší množství dat, řekněme v řádu tisíců hodnot, vyhodnocené koeficienty by pak, pro jednotlivé CAM softwary, přinesly mnohem lepší výsledky. Statistický pokus v této práci jsem uvedl pouze jako způsob možného řešení pro analýzu strojního času.

7.4. Shrnutí výsledků z praktického experimentu

V praktické části práce jsem se věnoval dvěma způsobům kompenzace strojního času. Vlastní experiment byl založený na měření velikosti vlivu zrychlení a zpomalení v jednotlivých blocích. Zjistil jsem, že při zanedbávání těchto vlivů vzniká v každém bloku chyba až 5 %. Připočteme-li k této chybě i odchylku, způsobenou úhlem, svíraným drahami sousedních bloků, dostáváme chybu 37 %. Avšak po přepočtu navrženým kompenzačním vztahem jsem se dostal na průměrnou chybu 13,5 %.

Druhý způsob kompenzace byl založený na statistickém modelu pro dva různé CAM softwary. Ze souboru hodnot naměřených strojních časů NC programů pro 3D frézování skutečných součástí jsem stanovil opravné koeficienty, z jejichž použitím jsem se dostal na chybu pod 5 %. V případě použití prvního způsobu kompenzace, by bylo zapotřebí opravit výpočtový model strojního času CAM softwaru, čímž by se zahrnoval vliv zrychlení a hodnota aktuální rychlosti řezného pohybu v jednotlivých blocích, v závislosti také na úhlu mezi drahami těchto bloků.

Vzhledem k náročnosti, kterou tento popisovaný způsob korekce času představuje, lze tedy na základě výše uvedených výsledků konstatovat, že statistický model nám umožňuje přesnější kompenzaci času a to i mnohem jednodušším způsobem. Je však nutné brát v úvahu, že kompenzační statistický model je specifický pro každý CAM software. Pro stanovení koeficientů dalších CAM softwarů by byla zapotřebí nová měření.

8. Závěr

Cílem této bakalářské práce byla studie o možných vlivech, v souvislosti s mechanickými parametry stroje, které způsobují nežádoucí odchylky mezi skutečným strojním časem a časem vygenerovaným CAM softwary. Uvádím zde na základě teoretických znalostí, získaných z nalezených zdrojů, a následně i vlastních praktických experimentů vliv kinematických vlastností pohonů. Popisuji zde, že největší vliv na odchylky mezi skutečnou a vypočtenou hodnotou času má zejména používaný princip výpočtů v CAM softwarech, kdy jsou potlačovány skutečné hodnoty rychlostí posuvů, které se během obráběcího procesu mění s časem, téměř v každém bloku. Dále, jak bylo zjištěno, jsou CAMem zcela zanedbávány hodnoty zrychlení pohonů při řezném pohybu, ale mnohdy i hodnoty rychlosti rychloposuvů, ačkoli jsou všechny tyto hodnoty stroji definované. Z výsledků uvedených experimentů poté vychází, že chyba způsobená zanedbáním akceleračních účinků pohonů dosahuje 5 % při maximální rychlosti posuvu, danou pro frézku FC 22 CNC, kterou jsem použil pro mé experimenty.

V teoretické i praktické části se také věnuji vlivu krátkých a dlouhých bloků na celkový čas, kde uvádím i výhody možnosti kontinuálního navazování bloků. Je důležité si uvědomit, že ačkoli jsou zjištěné chyby v řádech desetin i setin sekundy, v praxi u NC programů skutečných dílců, tvořených z mnoha bloků, tato chyba narůstá do řádů minut. V samotném závěru jsem se také, na základě poznatků z uvedeného zdroje, pokusil pomocí statistické analýzy určit opravné koeficienty pro dva zvolené CAM softwary, s pomocí nichž jsem se mohl více přiblížit skutečným hodnotám strojního času obecného NC programu.

Korekce strojního času má ve strojírenském průmyslu velký význam, zejména z ekonomického hlediska. Cílem každého výrobce je, již ve fázi plánování, přesně stanovit potřebný čas pro výrobu, kde má každá minuta obrovskou cenu. Mělo by být tedy snahou se, na základě aktuálního stavu stroje, pokusit opravit pomocí korekčních součinitelů, které by zahrnovaly skutečné kinematické schopnosti pohonů pro řezný pohyb i rychloposuv, výpočtový model daného CAM softwaru.

9. Seznam obrázků

Obr. 1: Trochoidní obrábění při konstantním opásání nástroje [14]	11
Obr. 2: Schéma trajektorie nástroje s tolerančním polem [6].....	13
Obr. 3: Kolísání rychlosti posuvu při lineární interpolaci [6]	15
Obr. 4: Vektorové znázornění pohybu pohonů při rovinné kruhové interpolaci [10]....	16
Obr. 5: Profil rychlosti posuvu při spuštěném NC programu [13]	18
Obr. 6: Kontury ve tvaru polygonů použitých v experimentu E. Y. Heoa [13].....	19
Obr. 7: Obrábění dlouhých bloků [13]	22
Obr. 8: Čtyři případy chování průběhu rychlosti posuvu NC bloku [13].....	24
Obr. 9 Rekurzivní algoritmus pro odhad strojního času [13].....	25
Obr. 10: Postup odhadu strojního času při NC obrábění [13]	29
Obr. 11: Vykreslení strojního času odhadnutého dle navržené metody [6]	35
Obr. 12: Model průběhu rychlosti posuvu využívaný CAM softwary a skutečný model	38
Obr. 13: Průběh zrychlení osy X při posuvu 6 000 mm/min	40
Obr. 14: Průběh zrychlení při rozjezdu osy X při posuvu 3 000 mm/min.....	40
Obr. 15: Průběh zrychlení rozjezdu osy X při rychlosti posuvu 1 500 mm/min	41
Obr. 16: Závislost počtu na sebe navazujících se bloků na strojním čase	42
Obr. 18: Závislost úhlu mezi základnou a dráhou bloku na strojním čase	45
Obr. 17: Kompenzace vypočteného strojního času pomocí rovnice regrese.....	45
Obr. 19: Vyhodnocení opravného koeficientu pro CAM software PowerMill	47
Obr. 20: Vyhodnocení opravného koeficientu pro CAM software FeatureCAM	47

10. Použitá literatura

- [1] POLZER, Aleš. *Akademie CNC obrábění (86)* [online]. 10.7. 2012 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-86_8621.html
- [2] *Využijte potenciál vašeho frézovacího centra naplno s technologiemi Delcam Vortex a Machine DNA* [online]. 18.3. 2013 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/vyuzijte-potencial-vaseho-frezovaciho-centra-naplno-s-technologie-mi-delcam-vortex-a-machine-dna_20620.html
- [3] PAGÁČ, Marek. *Seminář Delcam představil novinky Vortex a Machine DNA* [online]. 26.6.2012 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/seminar-delcam-predstavil-novinky-vortex-a-machine-dna-pk/>
- [4] VESELÝ, Jan, Matěj SULITKA a Jan SMOLÍK. *Simulace CNC obrábění* [online]. 28.06.2011 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-cnc-obrabeni.html>
- [5] KUBÁNEK, Pavel. *Zhodnocení strojních časů s využitím CAM systému v podniku Armatury Group a.s.* Ostrava, 2014. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Vedoucí práce Marek Sadílek.
- [6] COELHO, Reginaldo Teixeira, Adriano Fagali DE SOUZA, Alessandro Rodrigues ROGER, Aldo Marcel Yoshida RIGATTI a Alexandre Alves DE LIMA RIBEIRO. Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2010, **46**(9-12), 1103-1111 [cit. 2018-06-26]. DOI: 10.1007/s00170-009-2183-8. ISSN 02683768.
- [7] HILDER, Terry. *CNC – mozek stroje* [online]. 21.05.2003 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/cnc-mozek-stroje.html>
- [8] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů (8)* [online]. 30.4.2013 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-8_21037.html

- [9] KELLER, Petr. *Programování a řízení CNC strojů* [online]. 2005 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf
- [10] MÁČALÍK, Tomáš. *Analýza chování servopohonů u systému CNC firmy Siemens* [online]. Zlín, 2010 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13805/m%C3%A1%C4%8Dal%C3%ADk_2010_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. František Hruška, Ph.D.
- [11] *Vliv parametrů řídicích systémů na obrábění* [online]. 15.9.2014 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/vliv-parametru-ridicich-systemu-na-obrabeni_26805.html
- [12] HRABOVSKÝ, Adam. *Porovnání výkonných hrubovacích operací v CAM softwarech* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/31964/Hrabovsky_Adam_126048_B_P.pdf?sequence=1. Bakalářské práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jan Zouhar.
- [13] HEO, Eun-Young, Dong-Won KIM, Bo-Hyun KIM a F. FRANK CHEN. Estimation of NC machining time using NC block distribution for sculptured surface machining. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* [online]. 2006, **22**(5), 437-446 [cit. 2018-06-26]. DOI: 10.1016/j.rcim.2005.12.008. ISSN 07365845.
- [14] GRÝČ, Jan. *Evoluce v trochoidním frézování* [online]. 7.9.2016 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/evoluce-v-trochoidnim-frezovani.html>
- [15] LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů*. Západočeská univerzita v Plzni: Vydavatelství Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 2012.
- [16] TOMÍČEK, Jan. *Využití CL-dat při tvorbě NC programů*. Praha, 2012. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [17] Soubor hodnot strojních časů NC programů. Vygenerováno CAM softwary PowerMill a FeatureCAM v rámci laboratorních měření studentů fakulty strojní ČVUT v Praze. Studijní rok 2017/2018. Nahlédnutí umožnil Ing. Jan Tomíček Ph.D.