



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**FUNKCE SINUMERIKU OPERATE PŘI PROGRAMOVÁNÍ
CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ**

SINUMERIK OPERATE TOOLS FOR PROGRAMMING OF CNC MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Krejčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jan Krejčík
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Funkce Sinumeriku Operate při programování CNC obráběcích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při programování obráběcích strojů je možno využít řady různých programovacích jazyků a metodik. Vytvoření tematických ukázkových příkladů možností systému Sinumerik umožní přiblížit tuto problematiku osobám, které teprve volí vhodný způsob programovacího prostředí pro zajištění výroby třískovým obráběním na frézovacích a soustružnických obráběcích centrech.

Cíle diplomové práce:

- stručné srovnání řídicího systému Sinumerik 840D s ostatními řídicími systémy obráběcích strojů a s možnostmi vybraných CAD/CAM softwarů
- návrh a zpracování technické dokumentace obráběné součásti
- připravení výrobního procesu pro strojní vybavení ÚST FSI VUT v Brně

Seznam doporučené literatury:

GUPTA, K., ed. Advanced manufacturing technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56-98-4.

GRZESIK, W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier, [2017]. ISBN 978-0-444-63711-6.

DAVIM, J. P., ed. Surface integrity in machining. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978-1-848-2-873-5.

TSCHÄTSCH, H. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978--642-01006-4.

DAVIM, J. P., ed. Machining: fundamentals and recent advances. London: Springer, c2008, xiii, 361 s. ISBN 978-1-84800-212-8.

SREE HARSHA, K. Principles of physical vapor deposition of thin films. Amsterdam: Elsevier, 2006, 1160 s. ISBN 00-804-4699-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na možnosti splajnové interpolace a aproximace dat importovaných pomocí CAD Readeru do řídicího systému. První kapitola popisuje matematickou podstatu křivek, druhá kapitola ukazuje možnosti aproximace a interpolace v řídicím systému Sinumerik 840D a třetí kapitola tyto možnosti aplikuje na praktickém příkladu.

Klíčová slova

CAD Reader, komprese dat, Sinumerik 840D, splajn

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on possibilities of spline approximation and interpolation of CAD imported by CAD Reader to control system. First chapter describes mathematical meaning of curves, the second chapter shows possibilities of approximation and interpolation in control system Sinumerik 840D and the third chapter applies these possibilities on practical example.

Key words

CAD Reader, data compression, Sinumerik 840D, spline

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍK, Jan. *Funkce Simumeriku Operate při programování CNC obráběcích strojů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129557>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Funkce Sinumeriku Operate při programování CNC obráběcích strojů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Jan Krejčík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád v první řadě poděkoval panu doktoru Polzerovi za velmi ochotnou a přínosnou pomoc v průběhu vypracovávání celé závěrečné práce.

Dále bych také neméně rád poděkoval paní doktorce Sliwkové a panu profesoru Píškovi za rady v průběhu závěrečného semestru a ocenil zájem z jejich strany.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 Matematická podstata křivky a přístup k její modelování	9
1.1.1 Explicitní vyjádření.....	9
1.1.2 Implicitní vyjádření.....	10
1.2 Spojitost křivek	13
1.2.1 Parametrická spojitost.....	13
1.2.2 Geometrická spojitost	15
1.3 Modelování křivek	18
2 Možnosti křivek v rámci Sinumerik 840D sl a srovnání s HEIDENHAIN iTNC 530 21	
2.1 Možnosti splajnové interpolace v softwaru Sinumerik 840D	21
2.2 Kompresory dat.....	27
2.3 Cyklus 32	32
3 Praktická realizace	34
3.1 Neúspěšný import dxf souboru	34
3.2 Úprava CAD dat pro import dxf souboru	36
3.3 Úvaha o aplikaci aproximačních splajnů při uvažovaných uzlových bodech.....	41
3.4 Použití uzlových bodů.....	42
3.5 Možný přístup k realizaci	44
ZÁVĚR	48
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	52
SEZNAM PŘÍLOH.....	56

ÚVOD

CNC řízení je již řadu let standardem v oblasti třískového obrábění a s jeho aplikací se nabízí výroba tvarově složitějších obrobků, na které mohou být kladeny vyšší nároky. Matematické pozadí skrze řídicí systém umožňuje pracovat se splajnovou aproximací a interpolací, což nabízí poměrně rychlou úpravu vstupních dat bez nutnosti editace CAD podkladů. Je tedy možné do značné míry vstupní data podle potřeby upravovat přímo v řídicím systému. Tomu napomáhá i CAD Reader určený k rychlému importu CAD dat, které by bylo v prostředí řídicího systému složité vytvořit. Současně je možné s využitím polynomiální interpolace pracovat s externě získanou rovnicí.

Výsledný efekt takového přístupu nabízí plynulejší obrobene plochy, tvarově optimalizované dráhy nástroje a současně nižší namáhání stroje vlivem optimalizace obráběcího procesu dalšími patřičnými funkcemi. To má za důsledek prodlužování servisních odstávek stroje a v návaznosti na to pozitivní finanční dopad.

Veškerá činnost v rámci této diplomové práce byla vypracovávána ve výukovém softwaru SinuTrain ve verzích 4.7 a 4.8, který slouží jako podpora pro řídicí systém Sinumerik.

V textu se záměrně vyskytuje převzatý výraz „splajn“ z důvodu jeho standardního používání v psané podobě v rámci řešené problematiky, přestože toto slovo český jazyk nezahrnuje.

1 MATEMATICKÁ PODSTATA KŘIVKY A PŘÍSTUP K JEJÍ MODELOVÁNÍ

V drtivé většině případů se v současné době v oblasti strojírenství standardně pracuje s 3D technickou dokumentací. K jejímu zhotovení se nejen v prostředí patřičného CAD softwaru pracuje právě s křivkami, a to buď v rovině, nebo v prostoru. V rovině se pracuje s křivkami například při vytváření 2D skici, na základě které se příslušnými operacemi dodává modelu třetí rozměr. Křivky v prostoru lze demonstrovat na drátovém modelu tělesa.

„Křivka je jednoparametrická množina bodů v prostoru dimenze n , které jsou funkčními hodnotami bodové funkce jedné proměnné [1].“ Body jsou často zaměňovány za polohové vektory, které jsou funkčními hodnotami vektorové funkce jedné proměnné a v tomto případě je křivka tzv. hodografem právě této vektorové funkce [1]. Hodograf funkce je množina koncových bodů polohových vektorů [2].

V návaznosti na výše uvedenou definici v oboru reálných čísel R lze křivku chápat jako souvislou podmnožinu právě oboru reálných čísel, což je možné matematicky zapsat jako $k \subset R^n$. Exponent n reprezentuje dimenzi, ve které se křivka nachází. Pokud platí $n = 2$, jedná se o rovinnou křivku a pokud $n = 3$, tak se jedná o prostorovou křivku [1].

Aby bylo možné křivky vůbec vytvářet a pracovat s nimi, musí existovat jejich matematické vyjádření v euklidovské rovině, nebo prostoru, které je trojího typu [3]:

- explicitní,
- implicitní,
- parametrické.

1.1.1 Explicitní vyjádření

V prvním případě je křivka zadána jako spojitá funkce, ať se jedná o rovinnou (1.1), nebo prostorovou křivku (1.2).

$$y = f(x) \quad (1.1)$$

$$z = f(x, y) \quad (1.2)$$

Bývá orientována ve směru rostoucích hodnot x [4] a reprezentuje prostou matematickou funkci, jelikož jedna hodnota x odpovídá pouze jedné funkční hodnotě y . Tato nutná podmínka platí i pro uzavřené křivky [5], z čehož plyne, že je pro takové křivky explicitní vyjádření nepoužitelné. Výhodou explicitního vyjádření je snadné získání derivace v bodě, kterým prochází tangenta křivky. Tento fakt nabývá opodstatnění při řešení návazností, jak je uvedeno dále v podkapitole pojednávající o spojitosti křivek.

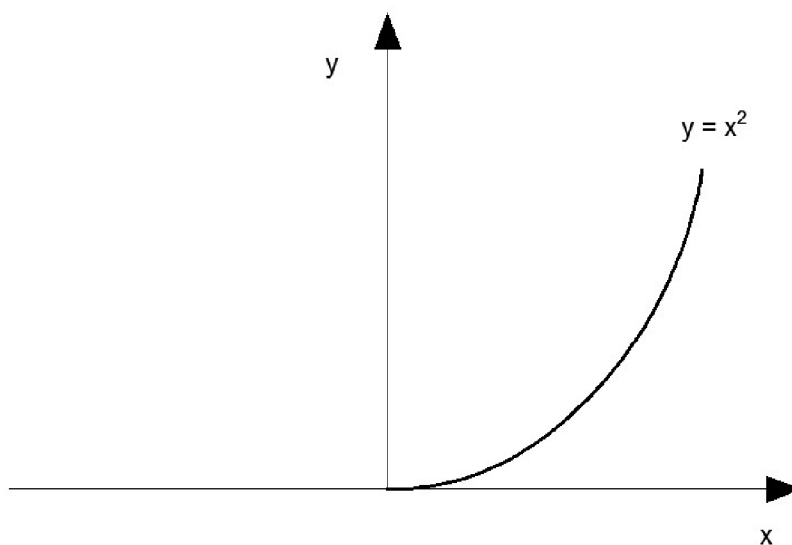
K demonstraci výše uvedené charakteristiky explicitního vyjádření bude použita parabola vyjádřena vrcholovou rovnicí (1.3).

$$(x - m)^2 = 2p \cdot (y - n) \quad (1.3)$$

Z podoby rovnice lze vyčíst, že osa paraboly je rovnoběžná s osou y kartézského souřadného systému druhého řádu a že je tzv. otevřená ve směru kladné poloosy y . Vrchol $[m, n]$ náleží počátku, tedy $[0, 0]$, a parametr p reprezentující vzdálenost ohniska od řídicí přímky je roven hodnotě 0,5. Aby byla výsledná křivka prostá, je nutné ji omezit na intervalu uvedeném u rovnice (1.4), která představuje rovnici (1.3) po odsazení výše zmíněného.

$$y = x^2; x \in \langle 0; \infty \rangle \quad (1.4)$$

Obr. 1.1 ukazuje průběh výše popsané paraboly (1.4) na uvažovaném intervalu. Počáteční bod odpovídá počátku $[0, 0]$ a je patrné, že funkční hodnoty směřují k nekonečnu.



Obr. 1.1 Grafické vyjádření rovnice (1.4).

1.1.2 Implicitní vyjádření

V oblasti CAD softwarů se jedná o nejrozšířenější vyjádření, na které lze narazit i v kombinaci s explicitním vyjádřením. U implicitního vyjádření je ve srovnání právě s explicitním vyjádřením zásadní rozdíl v tom, že nemusí být splněna podmínka prosté funkce, tedy že jedné hodnotě x může odpovídat více hodnot y . Obecný zápis implicitně zadané funkce uvádí rovnice (1.5).

$$F(x, y) = 0 \quad (1.5)$$

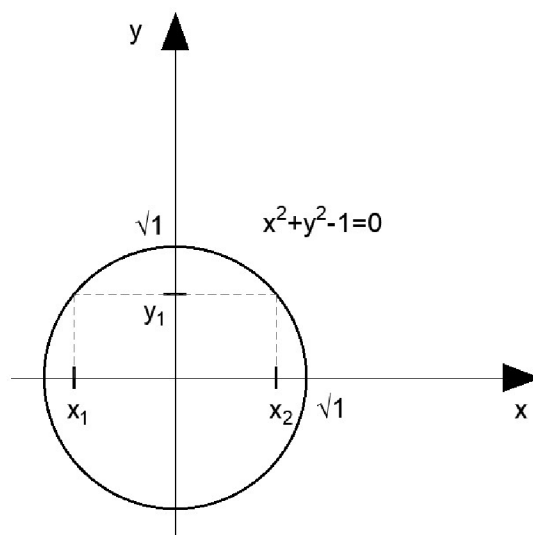
Rovnice (1.6) představuje kružnici zadanou její obecnou rovnicí, kterou lze získat roznásobením středové rovnice.

$$x^2 - 2mx + m^2 + y^2 - 2ny + n^2 - r^2 = 0 \quad (1.6)$$

Její střed $[m, n]$ je definován v počátku $[0, 0]$ a poloměr $r = 1$. Poté má rovnice tvar (1.7).

$$x^2 + y^2 - 1 = 0 \quad (1.7)$$

Obr. 1.2 ukazuje kružnici zadanou rovnicí (1.7) a lze na něm názorně demonstrovat zásadní rozdíl ve srovnání s explicitním vyjádření, tedy že jedné hodnotě y může odpovídat více hodnot x .



Obr. 1.2 Kružnice (uzavřená křivka).

Má-li být vyjádřena prostorová křivka, je nutné na ni nahlížet jako na průsečnici dvou ploch a v tomto případě by matematický zápis odpovídal rovnicím (1.8) a (1.9) [5].

$$F(x, y, z) = 0 \quad (1.8)$$

$$G(x, y, z) = 0 \quad (1.9)$$

Zobrazení takto implicitně vyjádřené křivky, jako je tomu na obr. 1.2, je poměrně obtížné a to díky tomu, že dané vyjádření neumožňuje postupný výpočet křivky [4]. Naproti tomu je vhodné za účelem testování oblastí, které jsou vymezeny právě implicitně zadanou křivkou nebo při výpočtu průsečíku s křivkou [5].

Obecně se jedná o nejčastěji používané vyjádření křivek v počítačové grafice, konkrétně fyzikálního charakteru, neboť je v daném případě křivka chápána jako pohybující se bod, jehož souřadnice jsou funkce parametru t (1.10), který je nejčastěji volen v rozsahu $\langle 0; 1 \rangle$ [4].

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.10)$$

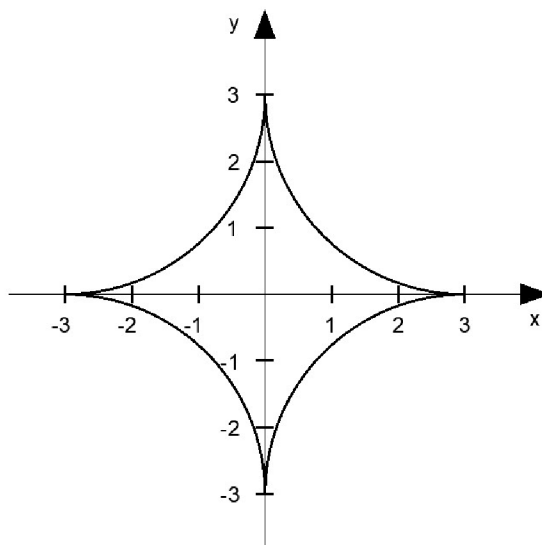
Těmito funkcemi je určena bodová (1.11) nebo vektorová (1.12) rovnice křivky [5].

$$Q(t) = [x(t), y(t), z(t)] \quad (1.11)$$

$$\vec{q}(t) = (x(t), y(t), z(t)) \quad (1.12)$$

Z praktického hlediska lze parametrickými rovnicemi (1.13) například vyjádřit asteroidu [6] zobrazenou na obr. 1.3.

$$x = 3 \sin^3 t, y = 3 \cos^3 t, t \in \langle 0, 2\pi \rangle \quad (1.13)$$



Obr. 1.3 Asteroida.

V úvodu kapitoly 1, který pojednává nejen o definici křivky, jsou mimo jiné zmíněny polohové vektory, jinak nazývané radiusvektory. Takový vektor $\vec{q}(t)$ se získá tak, že od bodové rovnice křivky $Q(t)$ se odečte bod představující počátek [5]. Na základě toho lze konstatovat, že velikost polohového vektoru je rovna vzdálenosti bodu $Q(t)$ od počátku.

Výhoda parametrického vyjádření křivky spočívá v závislosti pouze na jediném parametru t , který fyzikálně představuje čas. Tento fakt umožňuje parametricky vyjádřit průběhy křivek, které prochází vícekrát stejným bodem v prostoru a mimo to se mohou křížit nebo uzavřít opět jako na obr. (1.3). Mimo polohového vektoru se pracuje dále s tečným vektorem, který nabývá na významu při navazování křivek a skládání složitějších křivek (tvarů) z jednodušších. Dopadem je zkrácení času výpočtu a snížení paměťové náročnosti [4].

Tečný vektor v bodě $Q(t_0)$ se získá derivacemi jednotlivých složek parametrického vyjádření křivky (1.14) [4].

$$\vec{q}(t_0) = (x'(t_0), y'(t_0), z'(t_0)) = \left(\frac{dx(t_0)}{dt}, \frac{dy(t_0)}{dt}, \frac{dz(t_0)}{dt} \right) \quad (1.14)$$

Znalost tečného vektoru umožňuje definovat tzv. regulární bod křivky, za který je považován takový bod, kterému náleží pouze jedna hodnota parametru t z patřičného intervalu a současně je tečný vektor tohoto bodu nenulový [5].

Vlastní rovnice tečny, která se dotýká křivky právě v bodě $Q(t_0)$, se vypočítá jako součet tohoto bodu a tečného vektoru přímky (1.15). Výhodou parametrického vyjádření je skutečnost, že lze snadno vyjádřit tečny ke křivce, čehož se využívá při navazování křivek za účelem dosažení složitějších tvarů [4].

$$P(u) = Q(t_0) + u \cdot \vec{q}(t_0) \quad (1.15)$$

1.2 Spojitost křivek

Úvahu lze demonstrovat na příkladu automobilu. Na prvopočátku je myšlenka a poté křivky až už z pohledu designu, nebo z pohledu konstruování. Pokud je však určitá křivka příliš tvarově složitá, skládá se ze dvou a více dílčích křivek neboli segmentů. Motivace je zřejmá, každé křivce náleží jedna vektorová rovnice, to ale nemusí být vždy dostačující. Jednotlivé dílčí křivky se tedy napojují s tím předpokladem, že kvalita napojení musí odpovídat požadavku vzhledem k dané aplikaci [1].

V podkapitole 1.1.3 je zmíněno, že parametrické vyjádření křivek je obecně v počítačové grafice nejrozšířenější. V rámci parametrického vyjádření jsou za základní druh považovány křivky polynomiální (1.16). Jejich navázáním v počátečních, respektive koncových bodech, se získají křivky po částech polynomiální, za účelem jejich snadné vyčíslitelnosti a diferencovatelnosti. Je tedy snadné získat tečný vektor derivací jednotlivých složek parametrického vyjádření, což je výhodné z hlediska navazování křivek [4].

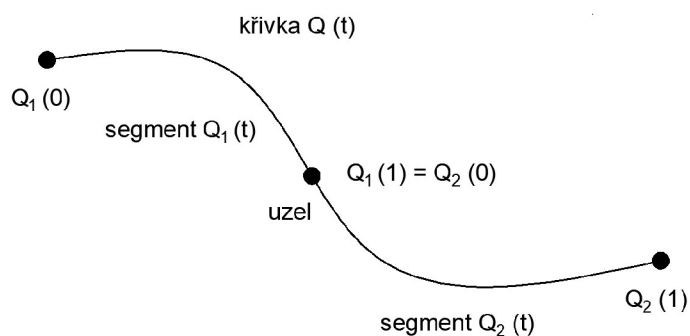
$$Q_n(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n \quad (1.16)$$

Nejpoužívanější polynomiální křivky jsou tzv. kubiky. Z matematického hlediska se jedná o polynomy 3. stupně. Důvodem je široká škála nabízených tvarů, ve většině případů výpočtová nenáročnost, možnost křivky snadno manipulovat a také zaručit C^2 parametrickou spojitost [4], která bude dále definována. Mimo parametrické spojitosti existuje spojitost geometrická.

1.2.1 Parametrická spojitost

Definice – „Křivka $Q(t)$, $t \in I = [a, b]$, má spojitost n -tého řádu v bodě $\alpha \in I = [a, b]$, právě když má její vektorová funkce v tomto bodě spojitost n -tého řádu. O takové křivce říkáme, že je C^n spojitá v bodě $\alpha \in I = [a, b]$ [1].“

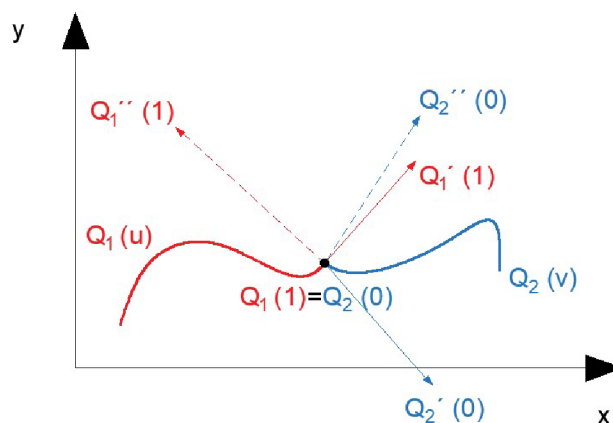
Pro názornost je uvažována křivka $Q(t)$ skládající se ze dvou segmentů $Q_1(t)$ a $Q_2(t)$, jak je naznačeno na obr. 1.4. Tyto segmenty jsou spojeny v bodě $Q_1(t) = Q_2(t)$, který je nazýván uzlem [4] (ve starší literatuře se lze setkat s označením dvojný bod).



Obr. 1.4 Křivka skládající se ze dvou segmentů napojených v uzlu podle [4].

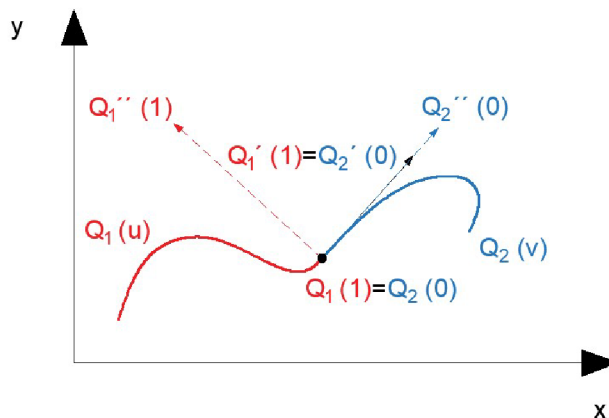
Rozlišují se 3 možné stupně spojení, kterým odpovídají obr. 1.5, 1.6 a 1.7. Dva uvažované segmenty jsou značeny $Q_1(u)$ a $Q_2(v)$ a barevně rozlišeny. Plnou čarou jsou značeny vektory prvních derivací a přerušovanou čarou vektory druhých derivací, které jsou však z důvodu značné velikosti zmenšeny. Totožné vektory jsou pak zobrazeny plnou, černou čarou.

- Spojení C^0 nastává v případě, kdy je koncový bod prvního segmentu Q_1 roven počátečnímu bodu druhého segmentu Q_2 [5].



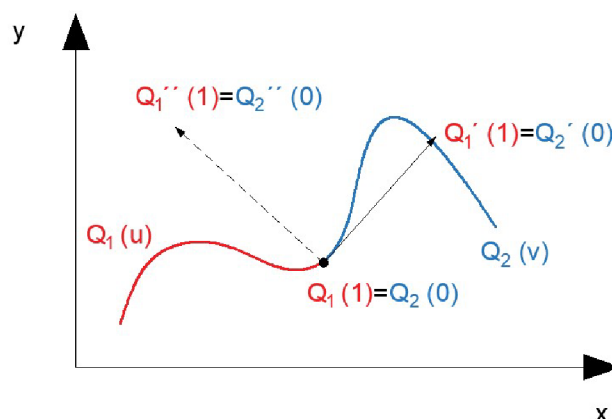
Obr. 1.5 C_0 spojitost podle [1].

- Spojení C^1 nastává v případě, kdy je tečný vektor v koncovém bodě prvního segmentu Q_1 roven tečnému vektoru v počátečním bodě druhého segmentu Q_2 (hladká křivka) [5].



Obr. 1.6 C_1 spojitost podle [1].

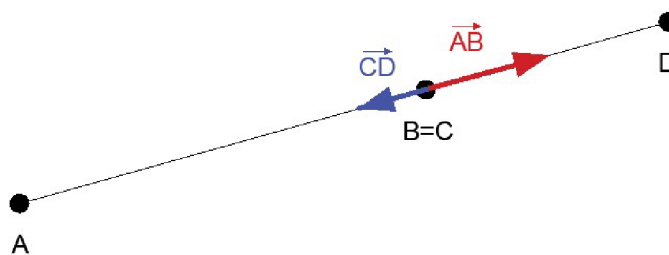
- Spojení C^2 nastává v případě, kdy jsou si první a druhé derivace v koncovém bodě prvního segmentu Q_1 , respektive počátečním bodem druhého segmentu Q_2 , rovny [5].

Obr. 1.7 C_2 spojitost podle [1].

Pro jednoduchost si lze výše zmíněné poznatky vysvětlit i tak, že s rostoucím stupněm křivky přímo úměrně narůstá „čas“, po který se oba segmenty přimykají ke stejnému směru. Pomyslný pohybující se bod v případě křivky se spojitostí C^0 by mohl náhle změnit směr, rychlost i zrychlení svého pohybu. V případě křivky spojitosti C^1 by mohl náhle změnit již pouze zrychlení. Ke změně zrychlení ale nedojde na spojení náležícímu křivce spojitosti C^2 , kde zůstává konstantní spolu se změnou rychlosti a směru [5].

1.2.2 Geometrická spojitost

Obr. 1.8 zobrazuje dvě úsečky AB a CD s tím, že $B = C$ je uzlový bod. Tečné vektory obou křivek \vec{AB} a \vec{CD} nejsou stejné a z toho důvodu se nejedná o C_1 spojitost. [5] To znamená, že pomyslný pohybující se bod může v tomto uzlu skokově změnit rychlost i zrychlení.



Obr. 1.8 Krajní příklad spojitosti podle [5].

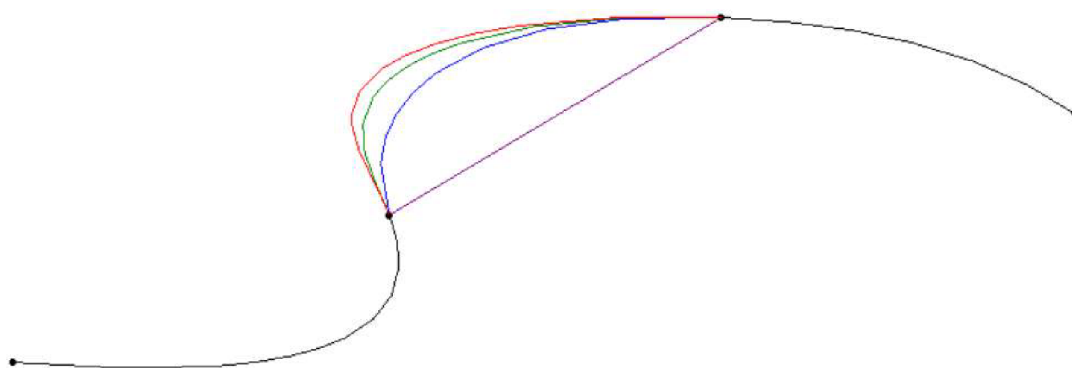
Geometrická spojitost je značena G^n a její škálování je analogické v porovnání s parametrickou spojitostí. Podmínkou je diferencovatelnost daných segmentů v uzlu [4], k čemuž musí být segmenty spojitě navázány a musí platit rovnice (1.17).

$$\left[\frac{\partial^n Q_1}{\partial x^n}, \frac{\partial^n Q_1}{\partial y^n}, \frac{\partial^n Q_1}{\partial z^n} \right]_{[x_0, y_0, z_0]} = h \cdot \left[\frac{\partial^n Q_2}{\partial x^n}, \frac{\partial^n Q_2}{\partial y^n}, \frac{\partial^n Q_2}{\partial z^n} \right]_{[x_0, y_0, z_0]}, \quad n > 0, h > 0 \quad (1.17)$$

Dva segmenty Q_1 a Q_2 jsou G^0 (pozičně) spojitě, když je koncový bod prvního segmentu Q_1 současně počátečním bodem druhého segmentu Q_2 . Dva segmenty jsou G^1 (tečně) spojitě, když jsou G^0 spojitě a současně jsou tečné vektory obou segmentů Q_1 a Q_2 rovnoběžné. [5] To znamená, že pomyslný bod pohybující se po uvažované křivce jako po

své trajektorii by za platnosti G^1 spojitosti v uzlu skokově nezměnil směr, ale rychlost ano. U G^2 spojitosti (křivostní) by nedošlo ke skokové změně rychlosti, u G^3 zrychlení a u G^4 rychlosti zrychlení.

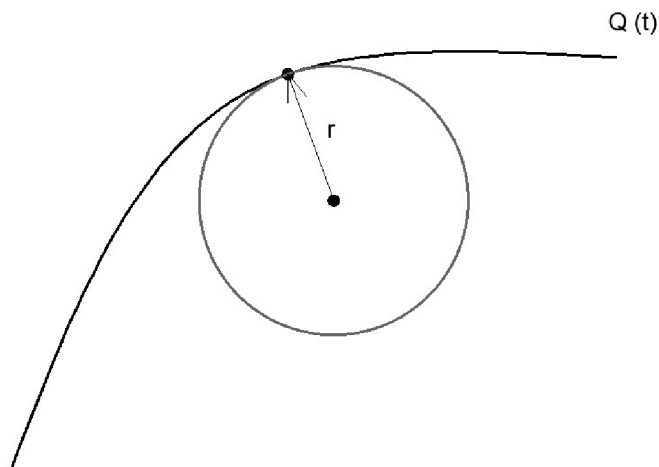
Vizuální rozdílnost v jednotlivých řádech spojitosti ukazuje obr. 1.9, na kterém je G^0 spojitost naznačena fialovou, G^1 modrou, G^2 zelenou a G^3 červenou barvou. Mimo to lze pozorovat počáteční a koncové body obou segmentů, respektive uzlové body. Jednotlivé spojitosti byly namodelovány v programu CATIA V5 v rámci modulu FreeStyle, který prostřednictvím nástroje Blend Curve umožňuje definovat zmíněné geometrické spojitosti.



Obr. 1.9 Praktická ukázka G^0 , G^1 , G^2 a G^3 spojitosti.

Rozdíl ve srovnání s parametrickou spojitostí je v tom, že je geometrická spojitost v uzlu definována neohledně na parametru t . Tedy že je definována nezávisle na způsobu vzniku obou křivek. Dále lze tvrdit, že prakticky je dosažení G^1 spojitosti snazší než dosažení C^1 spojitosti, která implikuje spojitost G^1 (ale ne naopak) s výjimkou případu, kdy je vektor rychlosti v uzlu $(0, 0, 0)$ [4].

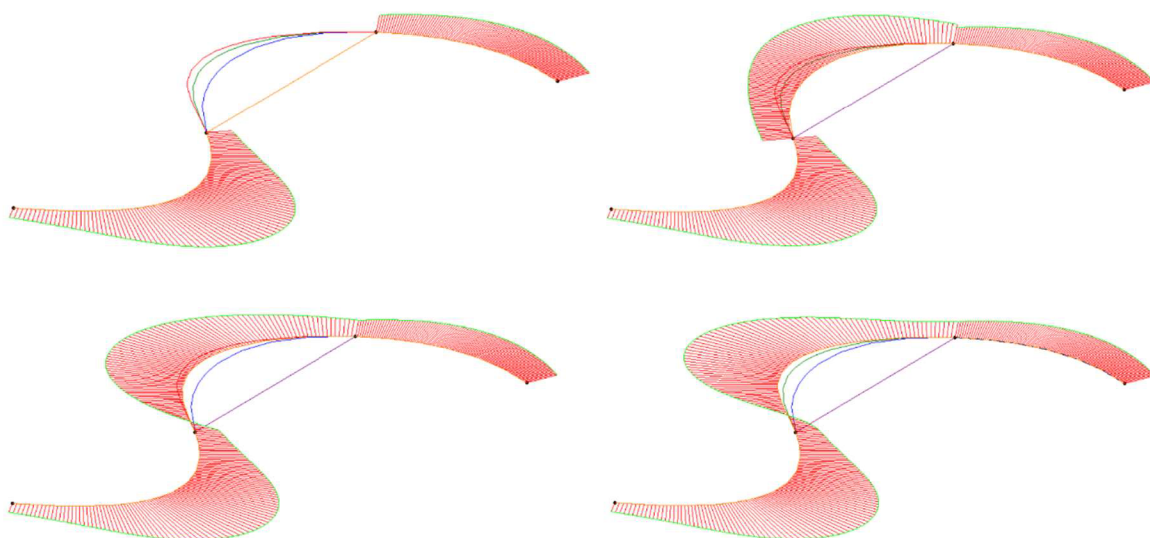
K hodnocení zakřivení a zaoblení ploch včetně kvality napojení jednotlivých segmentů používáme tzv. křivost k . Její hodnota odpovídá převrácené hodnotě poloměru oskulační kružnice naznačené na obr. 1. 10 a lze ji vyhodnotit v jakémkoliv bodě náležícím uvažované křivce s výjimkou inflexního bodu, ve kterém neexistuje nenulová druhá derivace. Právě tento fakt je v rozporu s definicí oskulační kružnice, která má s uvažovanou křivkou v určitém bodě stejnou jak první, tak i druhou derivaci. Poloměr takové kružnice odpovídá poloměru křivosti a její střed středem křivosti křivky [7]. Z hlediska práce s hodnotami je komfortnější pracovat s křivostmi než s rádiusy, jelikož v řadě aplikací je možné se setkat s hodnotami řádově klidně i v metrech. Jako příklad lze zmínit určité díly karoserie vozu nebo křídla letounu.



Obr. 1.10 Oskulační kružnice.

Na základě dílčích hodnot křivosti v uvažovaných bodech se vyhodnocuje graf křivosti, který leží na druhé straně křivky než oskulační kružnice a který nabízí na první pohled jasný grafický výstup. Vizualně lze do určité míry rozpoznat kvalitu napojení segmentů, jak ukazuje obr. 1.11, který vychází z obr. 1.9. V případě G^0 spojitosti (vlevo nahoře) se u prostředního segmentu graf křivosti nevykreslil. Důvodem je, že body spojuje úsečka.

Při pohledu na graf napojení dvou křivek spojitosti G^0 by dvě krajní normály reprezentující křivost v krajních bodech křivek byly různoběžné. U G^1 spojitosti (vpravo nahoře) lze pozorovat křivost na všech třech segmentech. Normály v krajních bodech každého segmentu jsou rovnoběžné, ale různě vysoké, to je v daném případě charakteristické. Mezi spojitostmi G^2 (vlevo dole) a G^3 (vpravo dole) je rozdíl pouze v plynulosti navázání. Lze jednoznačně odhalit inflexní body, tedy i konkávnost, nebo konvexnost křivky v určitém intervalu.

Obr. 1.11 Grafy křivosti pro G^0 , G^1 , G^2 a G^3 spojitosti.

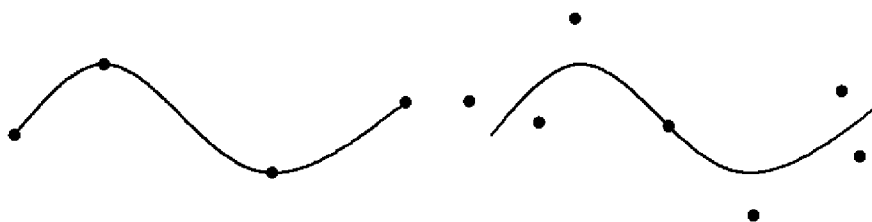
1.3 Modelování křivek

Výpočty odehrávající se v pozadí softwaru se opírají o teorii numerické matematiky, jejíž podstatou je řešení matematických otázek aplikací aritmetických operací [8]. Ve většině případů se jedná o náhradu nearitmetických veličin aritmetickými veličinami, nebo o zjišťování chyb při této náhradě, která se nazývá aproximace [9].

Má-li být funkci $g(x)$ nahrazena původní funkcí $f(x)$ s tím, aby měla v požadovaných bodech stejné funkční hodnoty a případně i hodnoty derivací právě jako funkce $f(x)$, pak se jedná o interpolaci [9].

Tvar křivky je ovlivňován řídicími body souhrnně nazývanými jako řídicí polygon křivky. Na základě toho, zdali křivka body přímo prochází, nebo se jim pouze přibližuje, ale může nimi také procházet, se rozlišují křivky interpolační a aproximační [4].

Většina objemových modelářů pracuje s aproximačními křivkami, ač se na první pohled může zdát, že uživatel zadává křivku na první pohled interpolační. Přičemž software převádí křivku na aproximační, a to z toho důvodu, že je jednodušší takové křivky matematicky vyjádřit. Pro názornost jsou oba zmíněné typy křivek naznačeny na obr. 1.12.



Obr. 1.12 Interpolační (vlevo) a aproximační (vpravo) křivka.

Tvarovat křivku v patřičném softwaru podle vlastních představ je triviální, uživatel pouze pohybuje řídicími body, nicméně matematické pozadí je složitější. Pro názornost je uvedena křivka $Q(t)$ zadaná parametrickými rovnicemi (1.18) až (1.20) [4].

$$x(t) = a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x \quad (1.18)$$

$$y(t) = a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y \quad (1.19)$$

$$z(t) = a_z t^3 + b_z t^2 + c_z t + d_z \quad (1.20)$$

Parametrické rovnice lze vyjádřit v maticovém tvaru (1.21). Tečný vektor se získá derivací vektoru T (1.22) [4].

$$Q(t) = TC = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \\ d_x & d_y & d_z \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

$$\vec{q}(t) = \frac{d}{dt}Q(t) = \frac{d}{dt}TC = [3t^2 \ 2t \ 1 \ 0] \quad (1.22)$$

Jak z výše uvedené rovnice (1.21), tak i z parametrických rovnic (1.18) až (1.20) je patrné, že kubiku v prostoru definuje 12 parametrů obsažených v matici C . Vzhledem ke snaze co nejkomfortněji upravovat tvar křivek v návaznosti na viditelné prvky, jako jsou například řídicí body, směry a tečné vektory, je výhodné separovat charakteristiky společně pro všechny křivky modelované stejným způsobem od individuálních charakteristik dané křivky. Z toho plyne, že matici C je možné rozepsat jako $C = MG$ s tím, že matice M je nazývána jako bázová matice a G jako vektor geometrických podmínek. Při pohledu na rovnici (1.23) lze vidět maticový součin TM , který je nazýván polynomiální bází a který je společný pro všechny křivky určitého typu. Naopak vektor geometrických podmínek G zahrnuje právě zmíněné viditelné prvky vhodné ke komfortní editaci křivek [4].

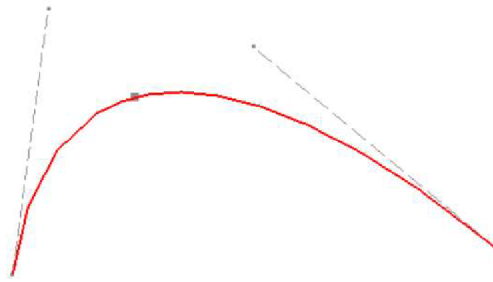
$$Q(t) = TMG = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Úpravou rovnice (1.23) se získá součet polynomů násobených geometrickými podmínkami (1.24) [4].

$$\begin{aligned} Q(t) = & (m_{11}t^3 + m_{21}t^2 + m_{31}t + m_{41}) \cdot G_1 + \\ & (m_{12}t^3 + m_{22}t^2 + m_{32}t + m_{42}) \cdot G_2 + \\ & (m_{13}t^3 + m_{23}t^2 + m_{33}t + m_{43}) \cdot G_3 + \\ & (m_{14}t^3 + m_{24}t^2 + m_{34}t + m_{44}) \cdot G_4 \end{aligned} \quad (1.24)$$

Bázové polynomy, základ bázových matic, obsahují proměnlivý parametr t , který prakticky nastavuje, jaká podmínka se více projeví na začátku, na konci, nebo mezi krajními částmi křivky [4].

Výše zmíněné bude přiblíženo na významném představiteli aproximačních křivek, kterým je Beziérova kubika. Důvodem vzniku bylo zavádění NC řídicích strojů ve francouzských automobilech na přelomu 50. a 60. let minulého století [10]. Jedná se o polynom třetího stupně zadaný čtyřmi řídicími body, který je na první pohled značně podobný Fergusonově kubice, ta je však výpočtově náročnější vlivem derivací, které obsahuje. Počet řídicích bodů plyne obecně z podmínky náležící Beziérovým křivkám, která říká, že počet řídicích bodů je $n + 1$ vzhledem ke stupni křivky [5]. V prvním řídicím bodu P_0 začíná a v posledním P_3 končí, jak ukazuje obr. 1.13. Krajní body přerušovaných úseček, které jsou vždy striktně tečné, reprezentují řídicí body a pátý bod náležící křivce reprezentuje parametr, kterým se řídí vyklenutí křivky, nicméně se nejedná o řídicí bod.



Obr. 1.13 Beziérova kubika.

Beziérovu kubiku definuje vztah (1.25) [10].

$$Q(t) = \sum_{i=0}^3 P_i \cdot B_i^n(t); t \in \langle 0; 1 \rangle \quad (1.25)$$

$B_i^n(t)$ je označení pro Bernsteinovy polynomy n -tého stupně, které mají matematický zápis (1.26) [10].

$$B_i^n(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}; t \in \langle 0; 1 \rangle; i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (1.26)$$

Patříčným dosazením hodnot $n = 3$ a $i \in \langle 0; 3 \rangle \subset N$ se získá výsledná podoba polynomů (1.27) až (1.29) [11].

$$B_0^3(t) = (1-t)^3 \quad (1.27)$$

$$B_1^3(t) = 3t \cdot (1-t)^2 \quad (1.28)$$

$$B_2^3(t) = 3t^2 \cdot (1-t) \quad (1.29)$$

$$B_3^3(t) = t^3 \quad (1.30)$$

Polynomy (1.27) až (1.29) se zapíší v maticovém tvaru (1.31) [4].

$$Q(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

Nemá-li být kubika vyjádřena v Beziérově reprezentaci, tedy pomocí čtyř řídicích bodů, ale v Hermitovské reprezentaci, tedy pomocí dvou bodů a dvou vektorů, je nutné znát matematický zápis těchto vektorů, který uvádí rovnice (1.32) a (1.33) [4].

$$\vec{p}(0) = 3(P_1 - P_0) \quad (1.32)$$

$$\vec{p}(1) = 3(P_3 - P_2) \quad (1.33)$$

2 MOŽNOSTI KŘIVEK V RÁMCI SINUMERIK 840D SL A SROVNÁNÍ S HEIDENHAIN ITNC 530

Mezi hlavní cíle splajnové interpolace lze jednoznačně zařadit zkvalitnění obecných ploch a neméně také optimalizaci výrobního procesu, pod kterou je možné si představit snížení finančních nákladů ať už tím, že bude zkrácen čas obrábění nebo že budou navyšovány intervaly mezi generálními opravami strojního vybavení. O praktických možnostech interpolace a i jiných způsobech zkvalitnění obráběcího procesu vzhledem ke dvěma zmíněným cílům pojednává následující kapitola obsahující také programové pasáže, na kterých je ukázána syntaxe patřičných funkcí a příkazů.

Zadání práce je orientováno na řídicí systém Sinumerik 840D sl. Důvod je jeho flexibilita a kompatibilita s ostatními řídicími systémy Sinumerik a navíc verze Solution Line je ve srovnání s verzí Power Line (pl) vývojově novější. Pro stručné srovnání v uvažované problematice je zvolen druhý významný řídicí systém na evropském trhu, kterým je iTNC 530 od společnosti Heidenhain. Jako alternativa k práci se splajny z hlediska zkvalitnění obrobenej plochy byl zvolen Cyklus 32. Mimo něj lze výslednou kvalitou povrchu zvýšit dále např. použitím funkce M128 pro polohování řezné části nástroje nebo dále funkcí TCPM, která první zmíněnou rozšiřuje.

2.1 Možnosti splajnové interpolace v softwaru Sinumerik 840D

Z hlediska interpolačních možností se rozlišuje lineární, kruhová a polynomiální interpolace [12]. Vzhledem k rozsahu a zaměření práce bude dále popisována pouze polynomiální interpolace, u které je možné pracovat s obecnými polynomy do určitého stupně anebo následujícími splajny:

- A-splajn,
- B-splajn,
- C-splajn.

V případě prvního zmíněného A-splajnu, jinak nazývaného Akima splajnu, se jedná o interpolační splajn, prochází tedy přímo uzlovými body. Důsledkem tohoto faktu je, že nevzniká nežádoucí zvlnění dráhy nástroje, přičemž v uzlových bodech není stálá křivost [13]. To zapříčiňuje změnu posuvové rychlosti nástroje v uzlovém bodě, což může dále zapříčinit kmitání jakožto nežádoucí doprovodný jev třískového obrábění. Dále se jedná o tzv. lokální splajn, což prakticky znamená, že změna jednoho uzlového bodu se projeví maximálně na šesti sousedních uzlových bodech. Vzhledem k tomu, že se jedná o interpolační splajn, je A-splajn vhodný pro interpolaci digitalizovaných bodů. Za tímto účelem se používají polynomy 3. stupně. [14] Proč tomu tak je nejen v daném případě, ale obecně v počítačové grafice, je uvedeno v podkapitole 1.2.

Ilustrativní příklad zápisu interpolace pomocí A-splajnu ukazuje obr. 2.1. Absolutně jsou definovány 4 vrcholy pomyslného čtverce se stranou 100 milimetrů a hloubkou řezu 1 milimetr. V závěru NC kódu je příkaz G1, který způsobí přepnutí zpět na lineární interpolaci za účelem vyjetí nástroje z místa řezu do bezpečné vzdálenosti nad povrch obrobku.

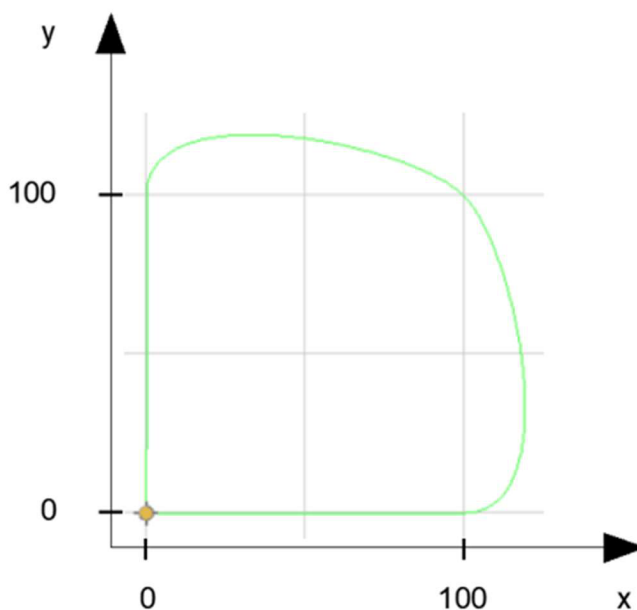
```

N10 T="CUTTER 4"
N20 M6
N30 S1000 M3
N40 G0 X0 Y0 Z1 F100 G64
N50 G1 X0 Y0 Z-1
N60 ASPLINE
; aktivace A-splajn interpolace
N70 X0 Y0 Z-1
N80 X0 Y100
N90 X100 Y100
N100 X100 Y0
N110 X0 Y0
N120 G1 Z1
N130 M30

```

Obr. 2.1 Zápís A-splajn interpolace.

Trajektorii nástroje definovanou NC kódem na obr. 2.1 ukazuje zelená křivka na obr. 2.2. Dle teoretického předpokladu splajn prochází definovanými vrcholy pomyslného čtverce.



Obr. 2.2 trajektorie nástroje pomocí A-splajn.

B-splajn, nazývaný také jako Beziérův splajn, je ve srovnání s prvním zmíněným naopak aproximačního charakteru. To znamená, že naprogramovanými body přímo neprochází, ale váže se k nim jako ke kontrolním bodům, ke kterým se přibližuje. V počátečním a koncovém bodě je splajn vždy tangenciální vzhledem k řídicímu polygonu. Vhodnost jeho aplikace spočívá v popisu drah nástrojů po plochách obecného tvaru s přihlédnutím k tomu, že B-splajn nabízí přechody se stálým zakřivením, které působí proti vzniku nežádoucího kmitání [13].

U každého bodu průběhu je možné definovat jeho váhu pomocí příkazu PW, kterému náleží hodnota z intervalu $\langle 0; 3 \rangle$. Je-li hodnota nižší než 1, splajn je k tomuto bodu méně přitahován a naopak je-li hodnota vyšší než 1, tak je k tomuto bodu naopak více přitahován

[14]. Defaultní hodnota rovna 1 náleží každému bodu řídicího polygonu a v tomto případě není příkaz v kódu uveden. Syntaxe příkazu PW s jeho hodnotami a B-splajn interpolace jsou naznačeny na obr. 2.3.

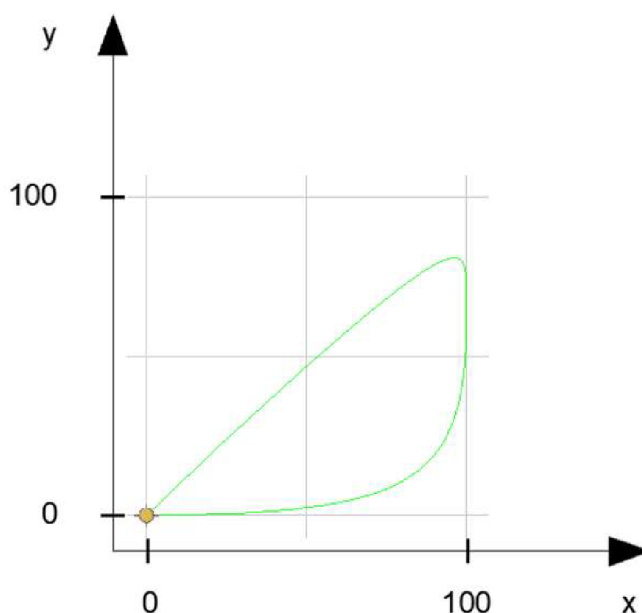
```

N10 T="CUTTER 4"
N20 M6
N30 S1000 M3
N40 G0 X0 Y0 Z1 F100 G64
N50 G1 X0 Y0 Z-1
N60 BSPLINE
;aktivace B-splajn interpolace
N70 X0 Y0 Z-1
N80 X0 Y100 PU=0
N90 X100 Y100 PU=3
N100 X100 Y0 PU=3
N110 X0 Y0
N120 G1 Z1
N130 M30

```

Obr. 2.3 Zápis B-splajn interpolace.

Opět je uvažován pomyslný čtverec s délkou jedné strany 100 milimetrů. Třem vrcholům s výjimkou [0; 0], ve kterém najíždí nástroj do řezu, je přiřazena váha s krajními hodnotami 0 a 3, její vliv ukazuje obr. 2.4.



Obr. 2.4 Trajektorie nástroje pomocí B-splajn.

Jako výchozí je použit B-splajn 3. stupně s tím, že aplikací příkazu SD a definováním hodnoty 2 je možné použít splajn 2. stupně [13]. Jeho syntaxi ukazuje obr. 2.5.

```

N60 BSPLINE
N70 SD=2

```

Obr. 2.5 Syntaxe B-splajn 2. stupně.

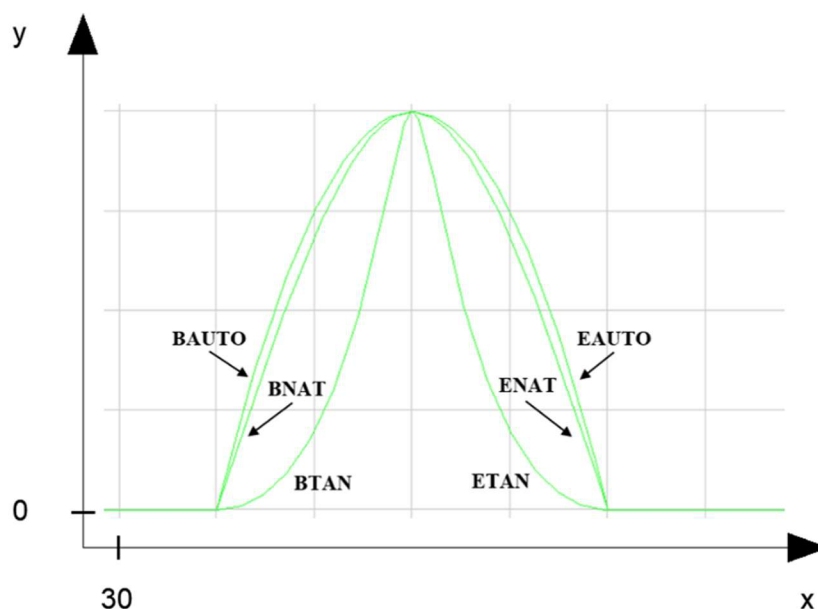
Stejně tak jako A-splajn je i C-splajn (kubický) interpolačního charakteru. Jeho výhoda spočívá ve stále stejné křivosti v uzlových bodech. V daném případě hrozí riziko neočekávaného kmitání ve srovnání s A-splajnem a dále není tzv. lokální, tedy že změna jednoho uzlového bodu ovlivní více než 6 okolních uzlových bodů [14]. Opět se jedná defaultně o splajn 3. stupně [15].

V případě interpolačních splajnů (A-splajn a C-splajn) lze definovat okrajové podmínky mezi navzájem navazujícími segmenty. Jedná se o skupinu příkazů náležící začátku křivky a skupinu příkazů náležící konci křivky [14]. Obě uvádí tab. 2.1.

Tab. 2.1 Příkazy okrajových podmínek podle [13].

skupina náležící začátku křivky	
BAUTO	žádný příkaz (navázání vychází ze vzájemné polohy sousedních řídicích bodů)
BNAT	nulové zakřivení
BTAN	tangenciální zakřivení
skupina náležící konci křivky	
EAUTO	žádný příkaz (navázání vychází ze vzájemné polohy sousedních řídicích bodů)
ENAT	nulové zakřivení
ETAN	tangenciální zakřivení

Vizuální rozdílnost výše uvedených příkazů ukazuje obr. 2.6. Jedná se o navázání 3 segmentů v krajních bodech. Dva krajní segmenty jsou realizovány lineární interpolací (G1) a prostřední segment pomocí C-splajn interpolace (CSPLINE).



Obr. 2.6 Vizuální rozdílnost okrajových podmínek.

Část G kódu náležícímu obr. 2.7 ukazuje obr. 2.6. Ten konkrétně ukazuje aplikaci příkazů BAUTO a EAUTO, které jsou záměrně uvedeny v místě mezi první lineární interpolací a C-splajn interpolací, čemuž odpovídá vedlejší blok N70. Lze pozorovat, že příkaz EAUTO začne být aktivní v okamžiku čtení vedlejšího bloku N110, kterému opět náleží lineární interpolace.

```

N40 G0 X0 Y0 Z1 F100 G64
N50 G1 X0 Y0 Z-1
N60 G1 X40 Y0
N70 BAUTO EAUTO
N80 CSPLINE
N90 X60 Y40
N100 X80 Y0
N110 G1 X120
N120 G1 Z1
N130 G0 X200 Y200
N140 G0 X0 Y200
N150 G0 X0 Y0

```

Obr. 2.7 Syntaxe okrajových podmínek.

Vlastní polynomiální interpolace umožňuje definovat splajn obecného zápisu, a to maximálně 3. stupně do SW 5 nebo maximálně 5. stupně od SW 6 [14]. Obecný zápis takových splajnů uvádí rovnice 2.1 a 2.2 s tím, že proměnné a_n představují konstantní koeficienty a x^n parametry polynomu.

$$y(x) = a_0x^0 + a_1x^1 + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (2.1)$$

$$y(x) = a_0x^0 + a_1x^1 + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \quad (2.2)$$

Pokud by bylo cílem touto cestou interpolovat např. kvadratickou funkci, bylo by nutné položit patřičné konstantní koeficienty rovné nule, jak ukazuje rovnice 2.3 vycházející z polynomu 3. stupně, tedy rovnice 2.1.

$$y(x) = 0x^0 + 0x^1 + a_2x^2 + 0x^3 \quad (2.3)$$

Výhoda tohoto přístupu interpolace ve srovnání s A, B, nebo C-splajny spočívá v ulehčení výpočtu koeficientů, který se odehrává v matematickém pozadí řídicího systému [14].

Aplikace polynomiální interpolace v G kódu je z hlediska vyvolání principiálně shodná s vyvoláním A, B, C-splajnů nebo dále např. G0 a G1 lineární interpolací na základě toho, že odpovídá první G-skupině, což znamená, že pokud je aktivní, není nutné programovat syntaxi polynomu. Vypnutí polynomiální interpolace se docílí vyvoláním jiného příkazu G-skupiny [13].

Polynomiální interpolace je vyvolána příkazem POLY. Syntaxi do SW 5 uvádí rovnice 2.4 a od SW 6 rovnice 2.5.

$$PO[X] = (Xe, a2, a3) PO[Y] = (Ye, b2, b3) PO[Z] = (Ze, c2, c3) PL=n \quad (2.3)$$

$$X = PO(Xe, a2, a3, a4, a5) Y = PO(Ye, b2, b3, b4, b5) \quad (2.4)$$

$$Z = PO(Ze, c2, c3, c4, c5) PL = n$$

Proměnné X, Y a Z představují identifikátory osy, hodnoty proměnných X_e, Y_e a Z_e odpovídají souřadnicím koncového bodu daného polynomu v patřičných osách, proměnné a_1, a_2, \dots, a_5 , stejně tak jako v případě rovnic 2.1 a 2.2, vyjadřují konstantní koeficienty řešeného polynomu a PL odpovídá délce intervalu parametrů, ve kterém jsou polynomy definovány. Jinak řečeno se jedná o definiční obor funkce $y(x)$, který vždy začíná hodnotou 0 a končí hodnotou PL s tím, že tato hodnota náleží intervalu $\langle 0,0001; 99999,9999 \rangle$. Interval parametrů platí vždy pouze pro blok, ve kterém se nachází a pokud není v syntaxi hodnota definována, znamená to, že se defaultně rovná 1 [13].

Pro ukázkou praktického zápisu v prostředí řídicího systému je použit polynom náležící rovnici 2.5.

$$y(x) = -4,503 + 10,655x - 4,980x^2 + 0,714x^3 \quad (2.5)$$

Obr. 2.8 ukazuje syntaxi polynomu z rovnice 2.5 do verze SW 5. Po lineární interpolaci v bloku N50 následuje vyvolání polynomiální interpolace, která je ukončena blokem N70, jelikož je zde opět vyvolána lineární interpolace. Proměnné b_2, b_3, c_2, c_3 nejsou v rámci uvažovaného polynomu definovány a na základě toho se hodnoty rovnají nule. Souřadnice koncového bodu splajnu jsou $[4; 4,133; -1]$. Hodnoty PL náleží $\langle 0; 4 \rangle$.

```
...¶
N50 G1                Z-1¶
N60 POLY PO[X]=(4, -4.98, 0.714) PO[Y]=(4.133, 0, 0) PO[Z]=(-1, 0, 0)¶
    PL=4¶
N70 G1                Z1¶
...¶
```

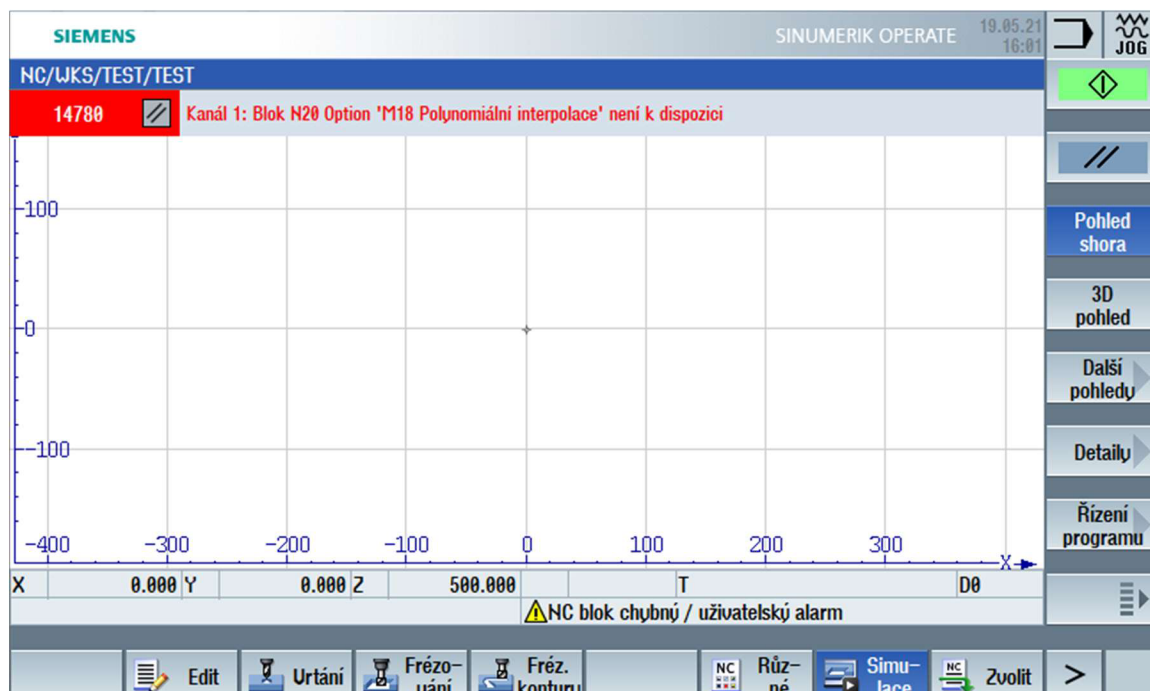
Obr. 2.8 Syntaxe polynomiální interpolace do SW 5.

Obr. 2.9 ukazuje taktéž zápis polynomu náležící rovnici 2.5 tentokrát se syntaxí pro verze od SW 6.

```
...¶
N50 G1                Z-1¶
N60 POLY X=PO(4; -4.98; 0.714; 0; 0) Y=PO(4.133; 0; 0; 0; 0) Z=PO(-1; 0; 0; 0;
0) PL=4¶
N70 G1                Z1 ¶
...¶
```

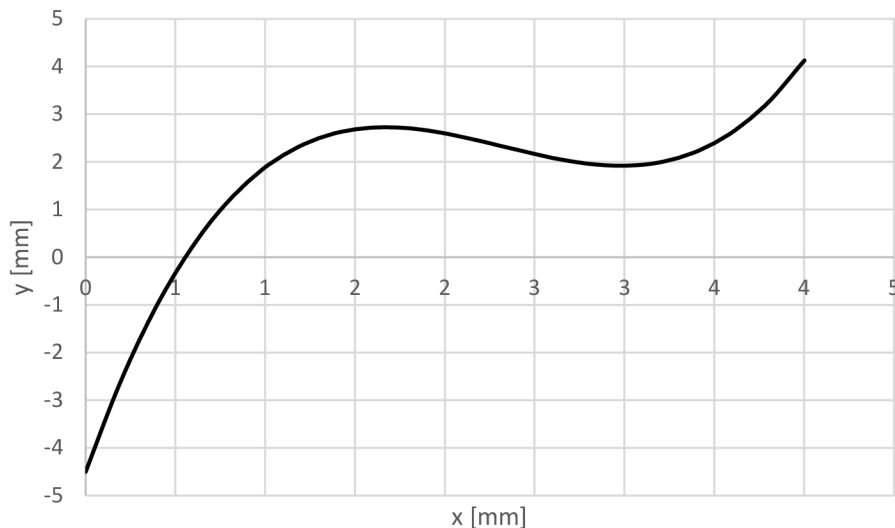
Obr. 2.9 Syntaxe polynomiální interpolace od SW 6.

V průběhu testování polynomiální interpolace a snaze simulovat ukázkové příklady jako je tento, bylo zobrazováno upozornění, že možnost polynomiální interpolace není nastavena, jak je ukázáno na obr. 2.10. V rámci správy licencí nebylo možné u verze SinuTrain 840D sl 4.7 a ani u verze SinuTrain 840D sl 4.8 změnit toto licenční omezení, a tedy simulovat trajektorii nástroje odpovídající výše uvedené syntaxi.



Obr. 2.10 Nemožnost simulace polynomiální interpolace.

Z tohoto důvodu obr. 2.11 ilustrativně ukazuje průběh uvažovaného polynomu náležícímu rovnici 2.5, který by tedy odpovídal trajektorii nástroje.



Obr. 2.11 Průběh polynomu náležící rovnici 2.5.

2.2 Kompresory dat

Pro díly obecných a nepravidelných tvarů je ve většině případů nutné použít CAM, nebo CAD/CAM systémy, ve kterých není G kód přímo psán uživatelem, ale je generován na základě definování jednotlivých obráběcích operací. Takový G kód je zpravidla poměrně obsáhlý, skládá se běžně řádově z několika tisíc bloků většinou na bázi lineární interpolace s přesností definovanou parametrem, který vymezuje tzv. pásmo tolerance. Jedná-li se o

členitou konturu, lze předpokládat, že bude objem dat značně obsáhlý, a to zejména s přihlédnutím k tomu, že se jedná o krátké úseky dráhy. Tento fakt omezuje rychlost zpracování dat [14].

Lineární bloky odpovídající řešené kontuře takto vygenerovaného G kódů jsou aproximovány, nebo interpolovány polynomickými bloky vzhledem ke konkrétním bodům a výsledkem je souvislá křivka náležící pásmu tolerance, které odpovídá nastavenému parametru pro daný stroj, nikoliv program. Z toho pramení výhody jako snížení počtu bloků G kódu [16], spojitě přechody mezi jednotlivými bloky a zvýšení maximální možné rychlosti pohybu po dráze [14].

Vlastní komprese dat je spuštěna, respektive ukončena funkcemi [13]:

- COMPON
- COMPCURV
- COMPCAD
- COMPOF

Aplikací funkce COMPON se zajistí spojitá rychlost mezi uvažovanými bloky, ale změna rychlosti může být skoková. Tento fakt může mít za následek nežádoucí vyvolání vibrační stroje [13]. V případě COMPCURV je navíc zajištěna spojitá změna rychlosti os. Rozšiřuje tedy první uvažovanou funkci, což způsobuje hladší průběh charakteristiky rychlosti na přechodech mezi bloky [14].

Komprese je zpravidla realizována pro bloky lineární interpolace (G1) a současně pouze v případě bloků s jednoduchou syntaxí. Tedy v případě bloků obsahující vedlejší blok (N), lineární interpolaci (G1), souřadnice a naklopení os (X, Y, Z, A, B, C), rychlost posuvu (F) a komentář. Navíc mohou obsahovat rozšířené adresy. Není-li tato podmínka splněna, nedochází ke kompresi takového bloku. Příklad části G kódu zahrnující kompresi ukazuje obr. 2.12. Syntaxe je v souladu s výše uvedenými pravidly.

```
...¶
N21021 COMPCURV ;aktivace komprese dat¶
N21022 G1 X15.324 Y18.257 Z-7.342 F500 ;první komprimovaná data¶
N21023 X15.548 Y18.469¶
N21024 X15.704 Y18.923¶
...¶
N24231 COMPOF ;deaktivace komprese dat¶
...¶
```

Obr. 2.12 Ukázka syntaxe funkce COMPCURV.

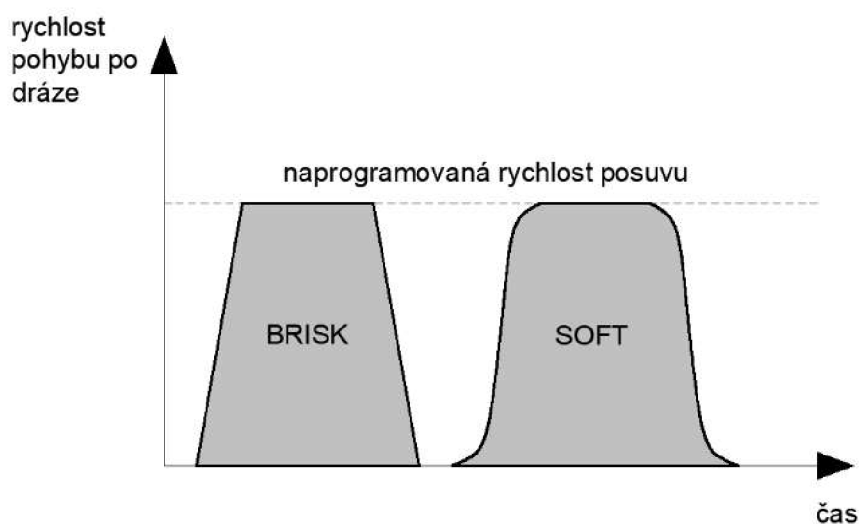
COMPCAD funkce zapřičiňuje vzhledem k rychlosti a kvalitě povrchu citelné snížení strojního času [14]. Kvalitou povrchu je myšleno dosažení A-Class plochy např. z pohledu zebra analýzy vlivem vysoce plynulého pohybu nástroje. Je doporučeno ji použít pouze v situaci, kdy není možné jakost povrchu zlepšovat již v CAM, nebo CAD/CAM systému. Doporučení používat tuto funkci s rozvahou je opodstatněné, jelikož je její aplikace paměťově a rychlostně náročná. Principem je stále vytváření do sebe přecházejících

polynomických bloků z hlediska zrychlení. Je možné definovat parametr mezního úhlu, od kterého nedochází k nahrazování lineární interpolace. [13] Odpovídá mu syntaxe `$SSC_CRIT_SPLINE_ANGLE` a nastavuje se přes menu `select` a `setup`. To znamená, že je tato hodnota vztažena ke stroji, nikoliv k programu. Po změně následuje vhodná úroveň resetu z důvodu zavedení parametru do potřebných systémových oblastí. Tento a další parametry se prakticky řeší u frézování forem v případě, kdy je kladen důraz na detaily. Za tímto účelem se výstupní CAM data promítají do parametrů.

Jak je již uvedeno, použití funkce `COMPCAD` zvyšuje kvalitu povrchu a rychlost os stroje. Kvalitu povrchu lze ještě navýšit použitím funkce `G642` pro přechodová zaoblení a funkce `SOFT` pro zrychlení po dráze s omezením trhnutí.

Podstatou první zmíněné funkce je povolení odchylky rohu na přechodových prvcích za účelem zvýšení plynulosti pohybu. Uživatel tak prakticky definuje větší toleranci a učiní tak nastavením strojního parametru `$MA_COMPRESS_POS_TOL` [15] opět na cestě menu `select` a `setup` stejně tak, jako tomu bylo u mezního úhlu.

Funkce `SOFT` obecně pracuje tak, že jednotlivé motory os pracují s konstantní hodnotou zrychlení až do dosažení naprogramované rychlosti posuvu [15] za účelem zvýšení kvality výsledného povrchu a nižšího namáhání stroje, které vede k nárůstu intervalů mezi generálními opravami. Opakem funkce `SOFT` je funkce `BRISK`, která pracuje s maximální hodnotou zrychlení až do dosažení naprogramované rychlosti posuvu [15], a to je optimální z hlediska času. Vzájemnou rozdílnost obou funkcí ilustrativně naznačuje obr. 2.13. Funkce `SOFT` najde své uplatnění zejména u dokončovacích operací a `BRISK` u hrubovacích operací.



Obr. 2.13 Rozdílnost funkcí `SOFT` a `BRISK` podle [15].

Obě zmíněné funkce se zapisují na začátku NC kódu. Obr. 2.14. ukazuje syntaxi takové části programu včetně `COMPCAD`.

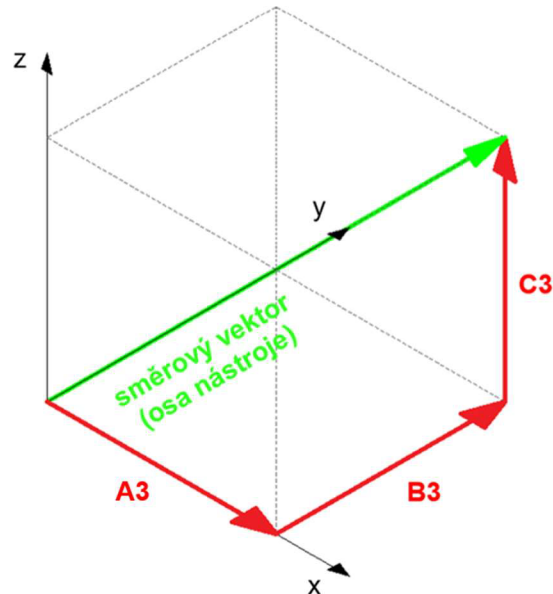
```
...¶
N8432 G1 X317.627 Y27.075 F1000 G642 ;aktivace funkce G642¶
N8433 SOFT ;aktivece funkce SOFT¶
N8434 COMPCAD ;aktivace komprese dat¶
N8435 X317.851 Y26.918 ¶
;zde začínají komprimovaná data¶
N8436 X318.061 Y27.102¶
...¶
N8923 COMPOF ;deaktivace komprese dat¶
N8924 G1 Z5¶
N8925 G0 X0 Y0¶
N8925 M30¶
```

Obr. 2.14 Ukázka syntaxe funkcí G642, SOFT a COMPCAD.

Pro všechny zmíněné funkce platí ukončení komprese dat pomocí funkce COMPOF [14] uvedenou za uvažovanou komprimovanou částí dat, jak je naznačeno na výše uvedených příkladech.

S přihlédnutím ke konstrukci stroje a počtu řízených os je možné kompresi dat kombinovat s transformací orientace nástroje vyvolanou funkcí TRAORI v G kódu [13]. Cílem je, aby poloha nástroje vůči obráběné ploše neodpovídala normále procházející osou nástroje v místě kontaktu, ale aby byl nástroj vzhledem k této poloze patřičně naklopen, v řadě případů přibližně o $12,5^\circ$. Za tímto účelem jsou potřeba rotační osy (A, B, C) vzhledem k lineárním osám. To prakticky zapříčiní, že při použití kulové frézy např. při obrábění forem nebude docházet k obrábění její špičkou, ale bodem na obvodu. Tím bude získán reálný průměr obráběcího nástroje a při uvážení zvolených otáček také reálná řezná rychlost. Naklápění nástroje je možné realizovat pomocí směrového vektoru, nebo Eulerova úhlu.

Směrovému vektoru náleží složky (adresy) A3, B3 a C3. Výsledkem je vektor odpovídající naklopení osy nástroje. Nezáleží na směru a velikosti tohoto vektoru, ale na jeho naklopení vzhledem k lineárním osám. Ilustrativně je naznačen na obr. 2.15. Tímto přístupem se docílí zadání orientace nezávisle na kinematice stroje, které je výhodné.



Obr. 2.15 Ilustrace směrového vektoru.

Ilustrativní G kód s transformací orientace pomocí směrového vektoru uvádí obr. 2.16. V bloku N290 je nástroj orientován rovnoběžně s osou z, tedy kolmo na rovinu G17 (XY), poté následuje zahloubení o 0,5 mm a lineární pohyb v ose y s tím, že postupně se nástroj naklání do hodnoty úhlu 45° mezi rovinami G17 (XY) a G18 (XZ).

```

...¶
N260 G0 X30 Y10 Z1¶
N270 TRAORI ;aktivace transformace¶
N280 G54¶
N290 A3=0 B3=0 C3=1 ;kolmo na G17¶
N300 G1 Z-0.5¶
N310 Y80 B3=1 C3=1 ;45° mezi G17 a G18¶
N320 Z=1¶
N330 A3=0 B3=0 C3=1¶
N340 TRAF00F ;deaktivace transformace¶
...¶

```

Obr. 2.16 Syntaxe funkce TRAORI a směrového vektoru.

S důrazem na kvalitu se doporučuje v případě lineárních os zadávat hodnoty na 5 desetinných míst a v případě směrových vektorů navíc na 6 desetinných míst [17].

V případě Eulerova úhlu se pracuje s adresami A2, B2 a C2, jejichž hodnoty odpovídají naklápění vůči osám souřadného systému [17]. V daném případě se však vytrácí výhoda ve srovnání s adresováním pomocí směrového vektoru díky tomu, že daný G kód je možné aplikovat pouze pro stroj s uvažovanou kinematikou, nikoliv pro stroj s jakýmkoliv koncepčním řešením. Příklad transformace pomocí Eulerova úhlu uvádí obr. 2.17.


```

...¶
N110 G0 X20 Y20 Z1¶
N120 TRAORI                               ;aktivace transformace¶
N130 G54 G1      Z-2¶
N140                               A2=45¶
;nakloneni nastroje kolem osy x o 45°¶
N150 G1 X40¶
N160                               C2=90¶
;nakloneni nastroje kolem osy z o 90°¶
N170      Y50¶
N180 TRAF00F                               ;deaktivace transformace¶
...¶

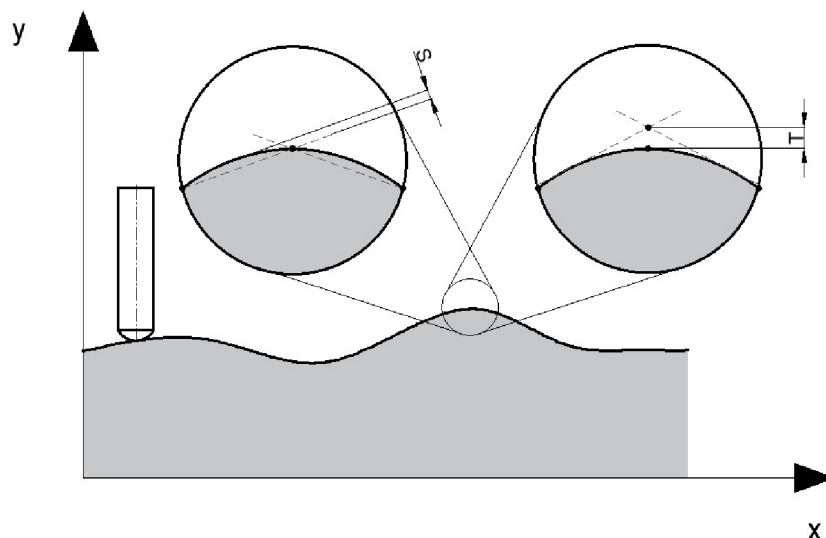
```

Obr. 2.17 Syntaxe funkce TRAORI a Eulerova úhlu.

2.3 Cyklus 32

Konkurenční dodavatel řídicích systémů Heidenhain vzhledem k uvažované problematice nabízí cyklus 32, který je jeho standardní součástí. Podstatou jeho aplikace je zvýšení výsledné kvality povrchu, snížení času (zvýšení rychlosti) obrábění s ohledem na definovanou geometrii obrobku a snížení opotřebení nástroje. Z toho vyplývá, že jeho aplikace je zejména výhodná při časově náročném obrábění obecných ploch, které je charakteristické častými změnami směru nástroje.

Jedná se o automatické vyhlazení dvou sousedních prvků dráhy s tím, že je zaručen stále stejný kontakt mezi nástrojem a obrobkem, což snižuje opotřebení nástroje. NC program, který je výstupem CAM systému, zahrnuje odchylku S , cyklus 32 definuje odchylku reprezentovanou parametrem T . Je-li hodnota odchylky S menší nebo rovna hodnotě parametru T , řídicí systém může vyhladit obráběnou konturu za předpokladu, že nejsou nastaveny žádné speciální limitní hodnoty omezující rychlost posuvu [18]. Obě zmíněné odchyly schematicky ukazuje obr. 2.18.

Obr. 2.18 Schematická ukázka odchylky S a parametru T podle [18].

Hodnota parametru T ovlivňuje dráhu nástroje po kruhových obloucích a čím je vyšší, tím vyšší může být maximální rychlost posuvu, nicméně vždy je zaručeno obrábění s ohledem na nastavenou hodnotu parametru. Pokud se jedná o hrubovací operaci, je kladen důraz na rychlost posuvu. V případě dokončovací operace je kladen důraz na přesnost kontury vzhledem k hodnotě parametru [19]. Ze zmíněného vyplývá, že zde proti sobě působí 2 základní faktory, kterými jsou rychlost posuvu a šířka pásma, ve kterém se může nástroj pohybovat. Pro dosažení optimálních výsledků je doporučeno dodržovat 110% až 200% hodnotu parametru T ve srovnání s odchylkou S [18].

3 PRAKTICKÁ REALIZACE

Závěrečná kapitola pojednává o přístupu k praktické realizaci modelu_1 uvedeného v příloze 2, ze kterého posléze vznikl model_2 náležící příloze 5. Následující podkapitoly popisují výslednou nevhodnou výstupní podobu CAD dat k importu pomocí CAD Readeru, dále snahu o úpravu těchto dat, která byla do jisté míry zdařilá, nicméně spolu s ní byly odhaleny jiné komplikace. Poté získání rovnice aproximační křivky vytvořené na základě uzlových bodů, v jejíž případě praktické realizaci kódu s použitím polynomiální interpolace zamezilo licenční omezení. Závěrečná podkapitola uvádí možný přístup k obrábění uvažované součástky alespoň po teoretické stránce.

Výkres náležící modelu_1 uvedený v příloze 4 odpovídá výrobnímu výkresu. Z něj vychází výkres náležící modelu_2 uvedený v příloze 7, který se liší v definování splajnů pomocí rovnic aproximačních polynomů a kótě maximálního průměru s ohledem na změnu geometrie při tomto přístupu programování. Veškerá činnost v rámci řídicího systému byla realizována v softwaru SinuTrain a testována ve verzích 840D sl 4.7 i 840D sl 4.8. Významná licenční omezení v případě simulace soustružení a polynomické interpolace znemožnila tvorbu odladěného a otestovaného G-kódu připraveného pro nahrání do stroje, tak alespoň následuje teoretická úvaha nad inovativní metodou obrábění dané součástky.

3.1 Neúspěšný import dxf souboru

Obr. 3.1 uvádí model_1 náležící příloze 2 určený k testování a aplikaci zmíněné problematiky, který byl vytvořen ve výukové verzi softwaru Inventor Professional 2019 a odpovídá mu výkres uvedený v příloze 4.



Obr. 3.1 Model_1.

Zakřivená část obvodu byla vytvořena pomocí funkce Interpolace spline ve skice v patřičné rovině a uzavřený profil byl dále standardně orotován kolem patřičné osy. Následovalo vytvoření dxf souboru odpovídajícího příloze 3, jehož podstatou je rozdělení splajnu uzlovými body a jejich proložení lineárními úseky, nicméně import souboru pomocí nástroje CAD Reader byl nezdařilý, jak je patrné z obr. 3.2, na kterém je znázorněna vizualizace dxf souboru jedné z předešlých verzí již zmíněného modelu_1.

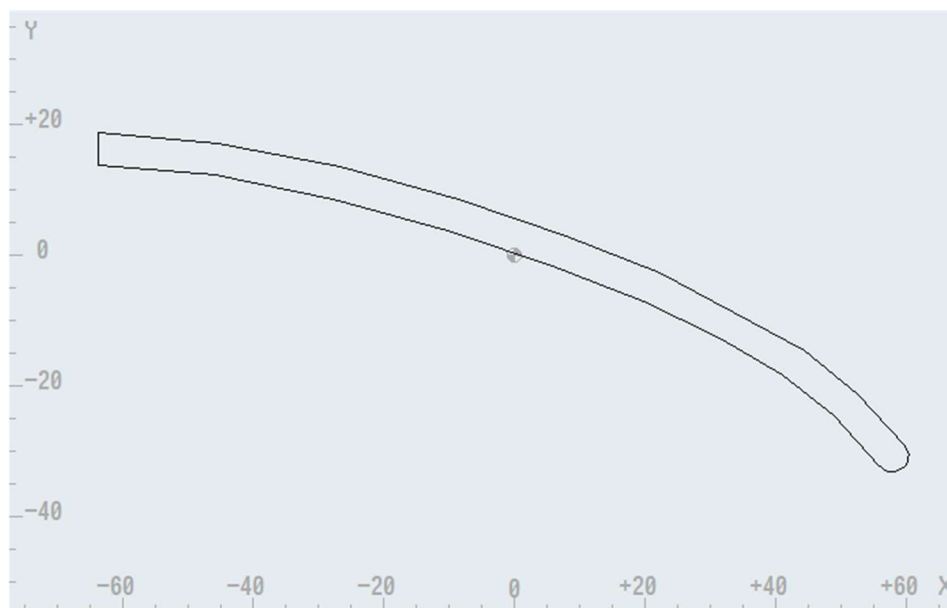


Obr. 3.2 Nezdařilý import dxf souboru pomocí CAD Readeru.

Importovaly se pouze úseky kontury vymodelované jinak než pomocí funkce Interpolace spline, což jednoznačně znemožňovalo další práci se souborem této podoby. Vliv neměl ani jiný přístup ke způsobu modelování splajnu, konkrétně pomocí zrcadlového odsazení od jednoho středního splajnu rovnoměrně na obě strany od středního.

Následně byly testovány další softwary, zdali s jejich pomocí dojde k vytvoření použitelného dxf souboru s tím, že uvažovaná křivka je vytvořena pomocí příkazu Spline. Konkrétně se jednalo o výukovou verzi AutoCAD 2019 taktéž od výrobce Autodesk, dále o Rhino 7 SR4 2021 a CATIA V5R21, nicméně výstupem žádného z uvedených softwarů nebyl použitelný dxf soubor. V případě softwaru AutoCAD a Rhino docházelo k identickému problému jako u Inventoru. U softwaru CATIA došlo k plnohodnotnému importu celé uzavřené kontury, nicméně uzlové body vzniklého splajnu proložené lineárními úseky byly tak vzdálené a náhodné, že i tento soubor byl z hlediska přesnější práce prakticky nepoužitelný. Prvním dílčím závěrem bylo konstatování, že import dxf souboru, u kterého je nějaká část vymodelovaná pomocí funkce Spline, není realizovatelný a je nutné zvolit jiný přístup.

Zpětně byl zjištěn druhý z dílčích závěrů, že u výukové verze softwaru Inventor Professional 2022 by byl import dat touto cestou pomocí CAD Readeru možný, tedy že došlo k importu splajnu, ale jedno zaoblení realizované pomocí kružnice bylo nahrazeno přímkou, jak ukazuje obr. 3.3. Muselo by tedy dojít k ruční editaci dat a namísto problémového elementu zapsat funkci G2, nebo G3 pro kruhovou interpolaci.



Obr. 3.3 Druhý nezdařilý import dxf souboru pomocí CAD Readeru.

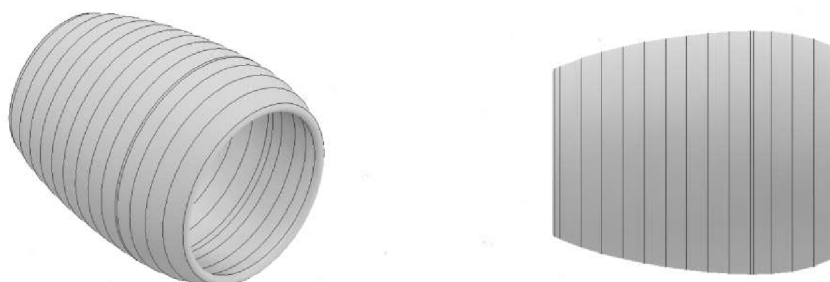
CAD Reader evidentně dokáže pracovat s kruhovými tvary vytvořenými přímo ve skice např. pomocí kružnic nebo zaoblení, jelikož na druhém konci došlo k plnohodnotnému přenosu zaoblení kontury pomocí kružnice ve skice. Jednotlivé elementy na sebe také navazují pomocí identických tečných vazeb. Import se tedy jeví jako nevyzpytatelný. V takovém případě by se nabízel identický přístup k úpravě modelu, jak je popsáno v následující podkapitole 3.2, nebo ruční editace kontury.

3.2 Úprava CAD dat pro import dxf souboru

Na základě poznatků a závěrů plynoucích z podkapitoly 3.1 došlo ke snaze patřičným způsobem upravit stávající model do podoby, kterou by CAD Reader akceptoval a se kterou by v SinuTrainu bylo možné dále plnohodnotně pracovat. Výsledkem je CAD model model_2 náležící příloze 5 a odpovídající dxf soubor uvedený v příloze 6.

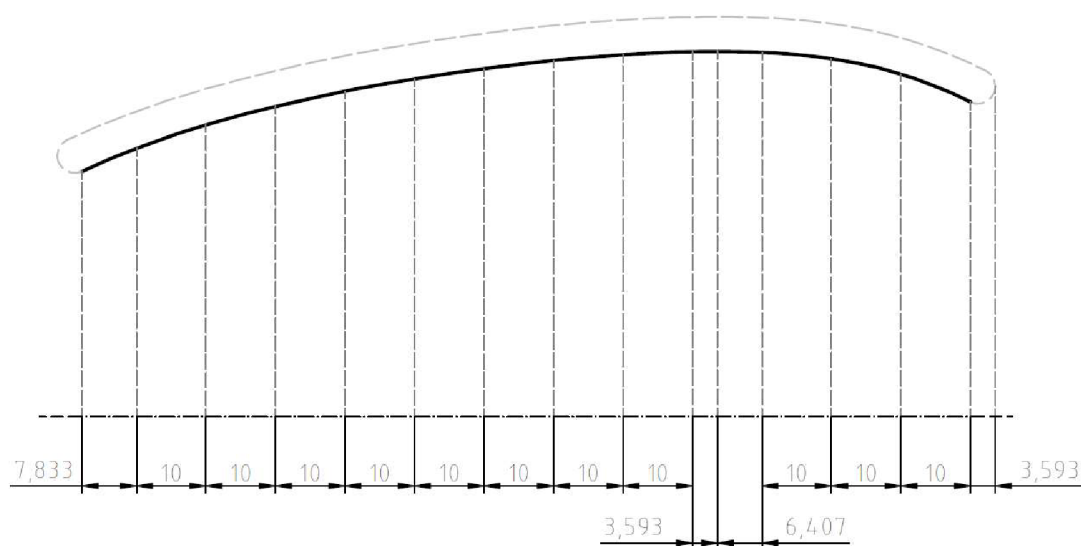
Poznátky plynoucí z podkapitoly 3.1, konkrétně z obr. 3.2, jsou, že CAD Reader akceptuje jako výstup z výukové verze Inventor Professional 2019 lineární úseky modelované standardně pomocí příkazu Čára, rádiusy a kružnice ve skice a zaoblení vytvářená již na 3D CAD modelu, nicméně nedokáže pracovat se splajny. Tím se definoval další dílčí cíl, kterým bylo nahrazení splajnových úseků uzavřené kontury tak, aby bylo možné s CAD daty importovanými pomocí CAD Readeru pracovat.

Jak již bylo zmíněno, podstatou dxf souboru je rozdělení křivek uzlovými body a jejich proložení lineárními úseky. Další myšlenky se tedy ubíraly touto cestou na základě zmíněné podstaty se snahou vynechat problematické úseky kontury a vše vyřešit již při tvorbě CAD dat. Na základě toho došlo k úpravě modelu_1 a vznikl model_2, kterému odpovídá obr. 3.4.



Obr. 3.4 Model_2.

Se splajnem bylo tedy pracováno pouze jako s konstrukční křivkou a sloužila ke zjištění uzlových bodů, které byly následně proloženy lineárními úseky. Je pochopitelné, že čím více uzlových bodů by bylo použito, tím přesnější by aproximace touto cestou byla. Na obr. 3.5 jsou vyobrazeny uzlové body vnitřního splajnu, mezi kterými byly proloženy lineární úseky.



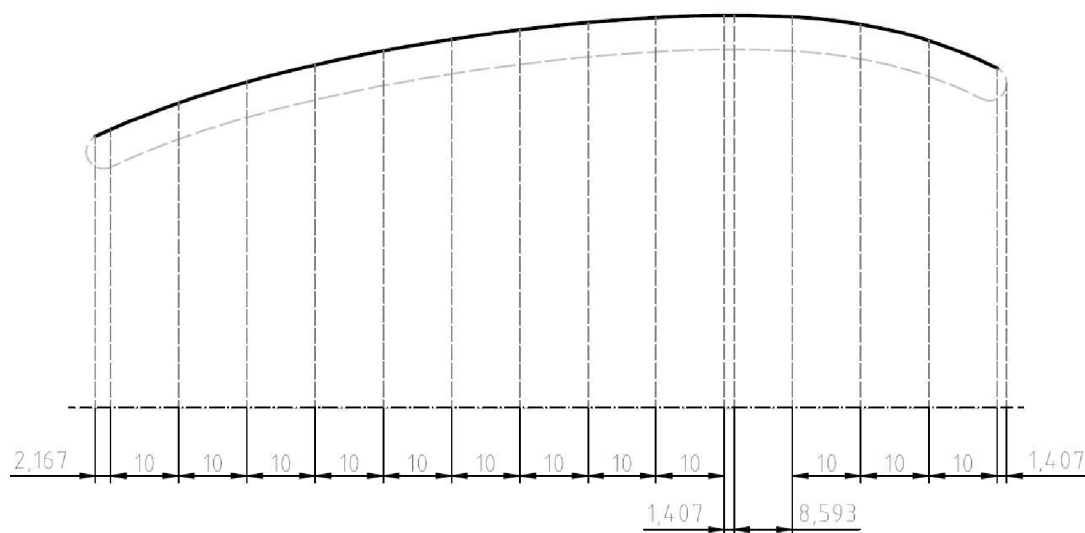
Obr. 3.5 Získání uzlových bodů vnitřního splajnu.

Náleží mu celkem 15 uzlových bodů uvedených v tab. 3.1, která současně uvádí i souřadnice vygenerované při importu dxf souboru model_2. Vzdálenost od počátku je uvažována zprava v absolutních souřadnicích. V obou uzlech mezi zaobleními a splajnem je stejně tak jako v případě modelu_1 aplikována tečná vazba.

Tab. 3.1 Uzlové body vnitřního splajnu.

vzdálenost od počátku [mm]	poloměr [mm]	vygenerované souřadnice uzlových bodů v SinuTrainu	
		x [mm]	y [mm]
3,593	45,252	10,452	-4,989
13,593	49,245	-0,316	-5,042
23,593	51,470	-10,419	-6,735
33,593	52,374	-20,028	-9,651
40,000	52,500	-26,013	-11,940
43,593	52,458	-29,327	-13,328
53,593	52,015	-38,429	-17,494
63,593	51,188	-47,387	-22,015
73,593	50,037	-56,223	-26,837
83,593	48,574	-64,942	-31,947
93,593	46,778	-73,536	-37,366
103,593	44,593	-81,984	-43,147
113,593	41,915	-90,247	-49,383
123,593	38,562	-98,256	-56,246
131,426	35,243	-104,269	-62,263

Jak je patrné z obr. 3.6, stejný postup byl aplikován i pro vnější splajn. Opět byl i zde záměrně proměřen nejvyšší bod splajnu.



Obr. 3.6 Získání uzlových bodů vnějšího splajnu.

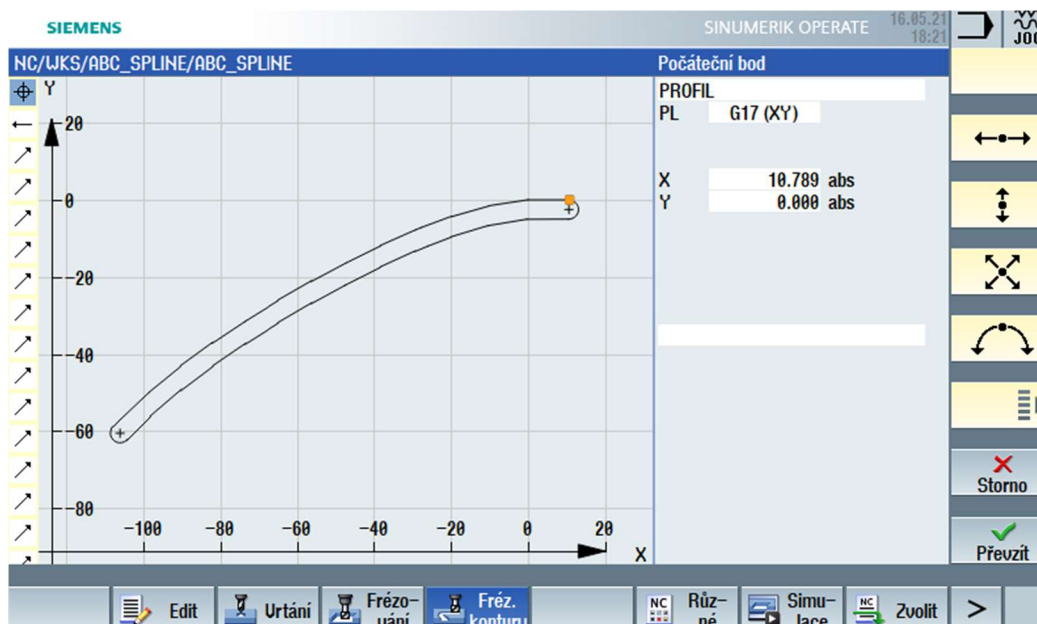
Tab. 3.2 ukazuje, stejně tak jako v prvním případě, odečtené hodnoty pro uzlové body vnějšího splajnu a jejich souřadnice vygenerované v SinuTrainu.

Tab. 3.2 Uzlové body vnějšího splajnu.

vzdálenost od počátku [mm]	poloměr [mm]	vygenerované souřadnice uzlových bodů v SinuTrainu	
		x [mm]	y [mm]
1,407	49,748	10,789	0,000
11,407	53,800	0,000	0,000
21,407	56,182	-10,163	-1,546
31,407	57,262	-19,837	-4,300
40,000	57,500	-27,890	-7,306
41,407	57,494	-29,192	-7,840
51,407	57,169	-38,339	-11,896
61,407	56,440	-47,333	-16,327
71,407	55,376	-56,202	-21,067
81,407	54,002	-64,954	-26,096
91,407	52,305	-73,585	-31,423
101,407	50,245	-82,080	-37,087
111,407	47,743	-90,409	-43,161
121,407	44,663	-98,521	-49,770
131,407	40,756	-106,322	-57,146
133,574	39,757	-107,956	-58,885

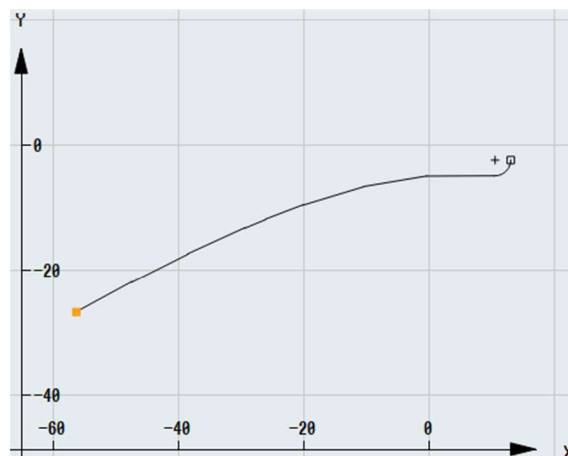
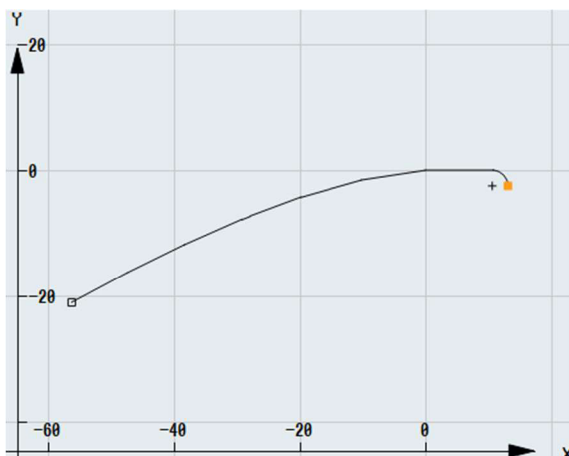
Jak je patrné z obr. 3.5 a 3.6, tyto body jsou rozmístěny po 10 mm s výjimkou krajních bodů a nejvyššího bodu z hlediska průměru. Znalost nejvýše položeného bodu splajnu byla nutná zejména z důvodu dodržení maximálního vnějšího průměru 115 mm uvedeného ve výkresu v příloze 4.

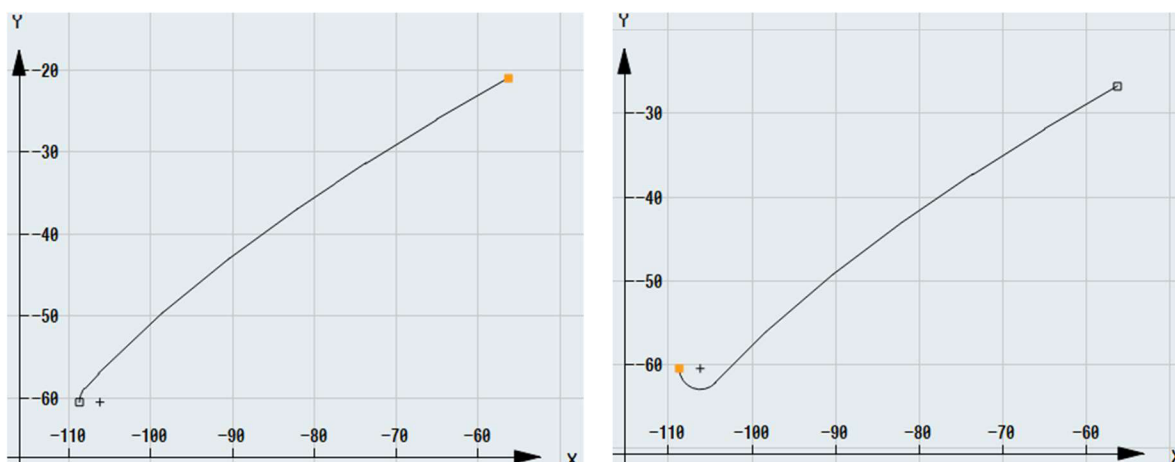
Takto upravený CAD model byl bez komplikací kompatibilní s asistencí CAD Readeru. Jeho kvalita a funkčnost je patrná z obr. 3.7. Možnost práce s ním byla ve verzi sl 4.7 i sl 4.8, ovšem pouze v modulu pro frézování. V modulu pro soustružení se vyskytlo obdobné licenční omezení jako u polynommické interpolace, které je popsáno v podkapitole 2.1. Licence soustružnického modulu SinuTrain 840D sl 4.7 a sl 4.8 neumožňují práci s CAD Readerem, což je jedním z dílčích závěrů při studování zde popsané problematiky. Obr. 3.7 tedy náleží frézovacímu modulu.



Obr. 3.7 Akceptace dxf souboru model_2.

Editací dxf souboru vznikly 4 křivky na obr. 3.8, které slouží jako podklad k soustružení modelu a jsou označeny model_2_krivka_1 (vlevo nahoře), model_2_krivka_2 (vpravo nahoře), model_2_krivka_3 (vlevo dole) a model_2_krivka_4 (vpravo dole). Uvádí je přílohy 8 až 11. Editaci bylo nutné provést mimo prostředí SinuTrainu z důvodu, že software detekoval zaoblené konce kontury jako jeden element, který nebylo možné rozdělit.



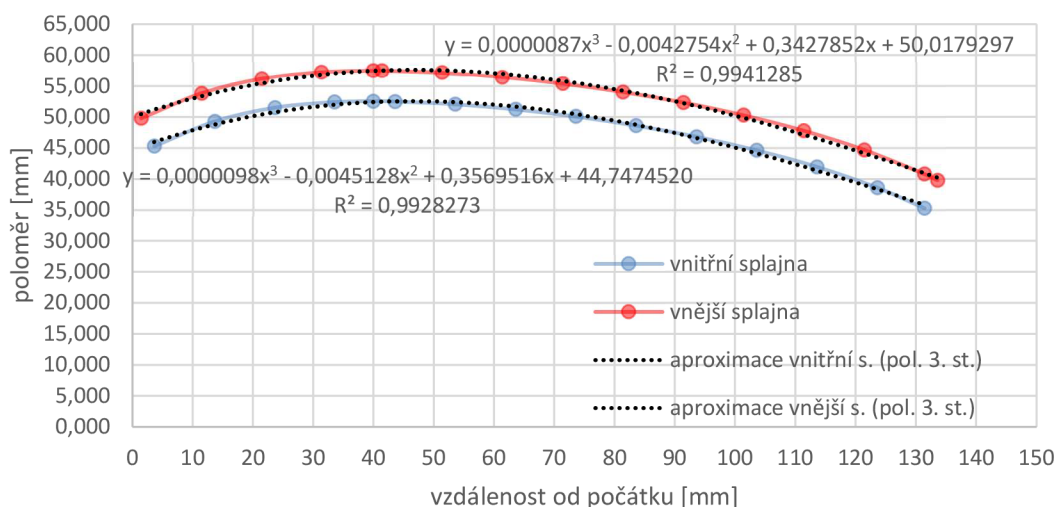


Obr. 3.8 Křivky jako podklad pro soustružení.

3.3 Úvaha o aplikaci aproximačních splajnů při uvažovaných uzlových bodech

Při aplikaci aproximačních splajnů je značný předpoklad dosažení kvalitnější plochy vlivem jeho vyšší plynulosti ve srovnání s interpolačním splajnem. Tento předpoklad by našel opodstatnění např. zejména u A-class ploch. Je však nutné si uvědomit, že by se z uzlových bodů staly řídicí body, kterými splajn přímo neprochází, což by změnilo geometrii obráběné součásti. Při této úvaze je nutné zohlednit výkres uvedený v příloze 4.

Základní vizuální rozdíl mezi aproximačními a interpolačními splajny při uvažování uzlových bodů uvedených v tab. 3.1 a tab. 3.2 odpovídajících výkresu v příloze 4 byla pozorována na základě vykreslení grafických průběhů a jejich záměrnému proložení polynomy 3. stupně. Tento záměr plyne z podkapitoly 1.2, ve které je uvedeno, že polynomy 3. stupně jsou nejen vzhledem k výpočtové nenáročnosti a současně široké škále nabízených tvarů nejrozšířenější. Výše popsané ukazují obr. 3.9.



Obr. 3.9 Grafické znázornění kontury a aproximační křivky.

Výstupem proložení uzlových bodů jsou rovnice 3.1 pro vnější a 3.2 pro vnitřní splajn s hodnotami regrese uvedenými v obr. 3.9. Vzhledem k jejich hodnotě blízké se 1,0 lze konstatovat, že je proložení polynomem 3. stupně zdařilé.

$$y = 0,0000087x^3 - 0,0042754x^2 + 0,3427852x + 50,0179297 \quad (3.1)$$

$$y = 0,0000098x^3 - 0,0045128x^2 + 0,3569516x + 44,7474520 \quad (3.2)$$

Na výkrese v příloze 4 je uvedena hodnota maximálního průměru dané součásti 115 mm na délce 40 mm od čela. Dosazením této hodnoty délky do rovnice 3.1 byla získána hodnota poloměru 57,45 mm při aplikaci aproximační křivky odpovídající zmíněné rovnici. Maximální průměr součásti by se tedy snížil o jednu desetinu na 114,9 mm. Na základě těchto odlišností musela být výkresová dokumentace upravena a je uvedena v příloze 7.

3.4 Použití uzlových bodů

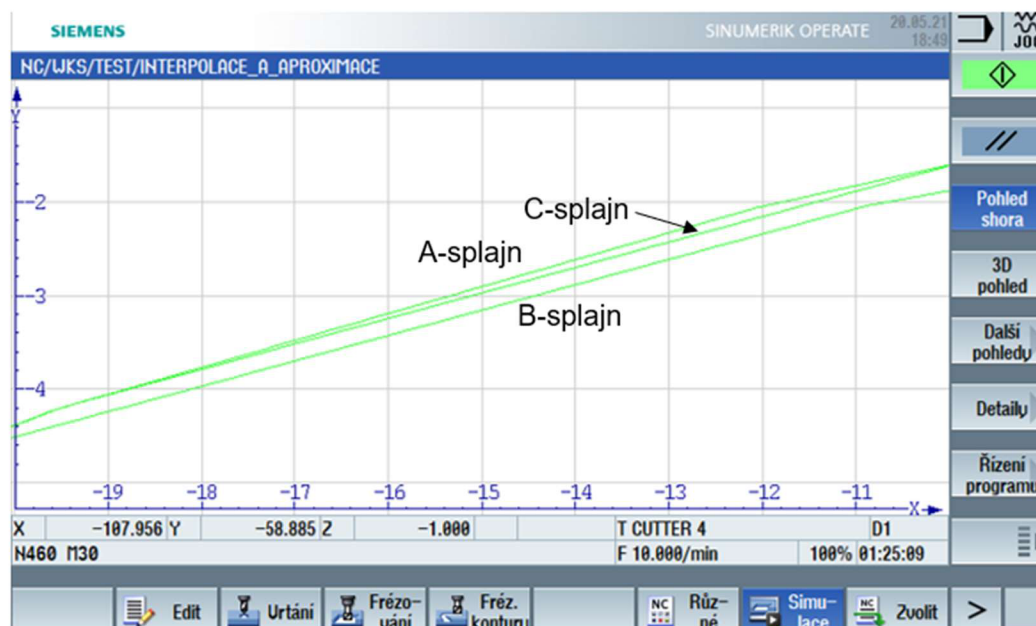
Při pohledu na uvažovaný model je zřejmé, že součástka je zcela vhodná pro technologii soustružení. V tomto smyslu je i orientována podkapitola popisující přístup k její výrobě. Nicméně už v podkapitole 3.2 je pojednáno o licenčním omezení v případě soustružnického modulu, které bylo zjištěno v průběhu vypracovávání diplomové práce. Vzhledem k tomu se veškerá následující práce alespoň ilustrativně odehrává ve frézovacím modulu.

Výše popsaným postupem byl importován dxf model řešené součásti s cílem pozorovat vizuální rozdílnost drah nástrojů při proložení uzlových bodů rozdílnými splajny. Na základě licenčního omezení popsaného v podkapitole 2.1 nebylo touto cestou možné simulovat a porovnávat aproximační křivky náležící obr. 3.9. Obr. 3.10 ukazuje úvodní část vygenerovaných dat dxf souboru, ze kterého je patrné, že tato data obsahují příkazy G-skupiny, což znamená, že v průběhu jejich čtení bude patřičná splajn funkce ukončena.

```
N40 G00 X0 Y0 Z1 F100 G64
N50 G1 Z-10
N60 ASPLINE
E_LAB_A_PROFIL: ;#SM Z: 4
G17 G90 DIAMOF; *GP*
G0 X10.789 Y0 ; *GP*
G1 X0 ; *GP*
X-10.163 Y-1.546 ; *GP*
X-19.837 Y-4.3 ; *GP*
X-27.89 Y-7.306 ; *GP*
```

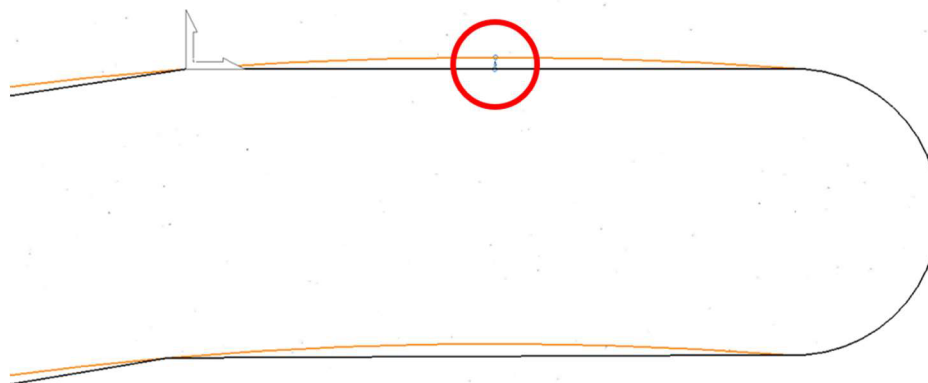
Obr. 3.10 Část vygenerovaných dat náležící.

Data byla ručně upravena a G-kód byl doplněn o A, B, C-splajn funkce. Vzhledem k vizualizačním možnostem simulace softwaru SinuTrain však nebylo možné takto vzniklé splajny jakkoliv blíže měřit apod. Obr. 3.11 tak pouze ukazuje 3 rozdílné splajny.



Obr. 3.11 Vizualizace A, B, C-splajnů.

Pozorování upraveného dxf souboru s názvem model_2 bylo do jisté míry možné v CAD/CAM softwaru PowerMill Ultimate 2021 určeného také pro pětiosé frézování a v návaznosti na to pro obrábění forem. Po importu dxf souboru bylo možné na základě uzlových bodů vytvořit interpolační splajny v editoru křivek a s použitím ručního nástroje pro měření měřit odchylky takto získaného splajnu od dxf souboru skládajícího se z lineárních úseků. Žádné bližší informace o takto vytvořených splajnech software neposkytuje. Obr. 3.12 ukazuje měření na prvním úseku vnějšího splajnu.



Obr. 3.12 Možnosti měření v PowerMill Ultimate 2021.

Naměřená hodnota odchylky odpovídající měřenému místu se souřadnicemi [5,3945; 0] je 0,205 mm. Hodnota blízká dvěma desetinám byla naměřena u všech úseků i na vnitřním splajnu. Je nutné si uvědomit, že splajn vytvořený v PowerMillu je ve srovnání se splajny vytvořenými v Sinumeriku založen na jiném matematickém pozadí a takto naměřené hodnoty je nutné považovat pouze za orientační.

3.5 Možný přístup k realizaci

Na základě předchozích kapitol vznikly 2 modely, dxf data a jim odpovídající 2 výkresy v Přílohách 4 a 7. Výkres odpovídající modelu_1 reprezentuje přístup realizace pomocí A, B, C-splajn aproximace a interpolace, výkres odpovídající modelu_2 reprezentuje přístup pomocí polynomiální interpolace. Na základě limitujících poznatků zjištěných v průběhu vypracovávání daného tématu, kterými jsou licenční omezení při simulaci polynomiální interpolace a modulu soustružení, bohužel nebylo možné prezentovat plnohodnotně odladěný a odsimulovaný program odpovídající obrábění uvažovaných modelů. Dále je tedy alespoň popsán možný přístup k realizaci obrábění uvažovaného modelu.

Vzhledem k zaměření práce, které prezentuje nejen možnosti zkvalitnění obrobených ploch, bylo vhodné uvažovat moderní a inovativní metodu třískového obrábění, která by mohla výsledný efekt umocnit. Současně už v předchozí podkapitole je zmínka o zřejmosti obrábění modelu_2 technologií soustružení a na základě těchto bodů byla vytipována metoda PrimeTurning od společnosti Sandvik Coromant. Její charakteristika je uvedena dále.

Výkresy předepisují polotovár KR 117 A-137 ČSN 425510.11 z materiálu 12 050.1 (C45). Zvolený materiál po normalizačním žíhání může vykazovat tvrdost do 225 HB a mez pevnosti přes 540 MPa.

Při pohledu na obr. 3.1, na kterém je možné pozorovat požadovaný obecný tvar součásti, je patrné, že součástka není vzhledem k upnutí úplně vyhovující. Evidentně je nutné obrábět na dvě upnutí a současně v jednom případě použít měkké čelisti sklíčidla respektující geometrii součásti. Postup obrábění je popsán na následujících obrázcích.

Podstata inovativnosti v případě metody PrimeTurning spočívá v použití nízkých hodnot úhlů nastavení hlavního ostří κ_r , které se pohybuje do úhlu 30° . Představu dokresluje obr. 3.13. Vlevo je naznačena VBD typu A určena k dokončovacím operacím a která bude dále uvažována pro návrh technologie. Vpravo je naopak naznačena VBD typu B určena k hrubovacím operacím. Zejména zde může mít nárůst hodnoty posuvu pozitivní dopad v případě nárůstu produktivity vzhledem k charakteru operace hrubování, kde je snaha co nejrychleji odebrat co největší množství přídavného materiálu.



Obr. 3.13 Úhly nastavení nástrojů určených pro soustružení metodou PrimeTurning [20].

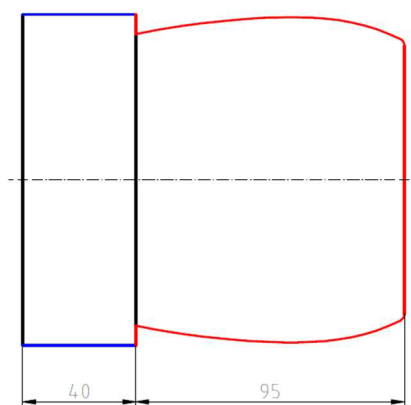
Nárůst hodnoty posuvu s kladením důrazu na konstantní tloušťku třísky ovlivňující silové zatížení spolu s odvodem tepla. Oba tyto faktory citelně ovlivňují životnost nástroje. Nízké hodnoty nastavení tedy ve výsledku mohou poskytnout vyšší produktivitu obrábění.

Rozsah hodnot řezných parametrů obou typů pro obrábění ocelí kategorizovaných jako P uvádí tab. 3.3.

Tab. 3.3 Rozsah hodnot řezných parametrů nástrojů CoroTurn Prime typu A a B [21].

	dokončování		hrubování	
	f_n [mm]	a_p [mm]	f_n [mm]	a_p [mm]
CoroTurn Prime typu A	0,40	2,0	-	-
CoroTurn Prime typu B	0,60	2,5	1,2	3,0

Obr. 3.14 ukazuje první soustružnickou operaci, kterou je vnější soustružení části kontury. Modrou barvou je zvýrazněna plocha pro upnutí do čelistí a červenou vnější soustružená kontura.



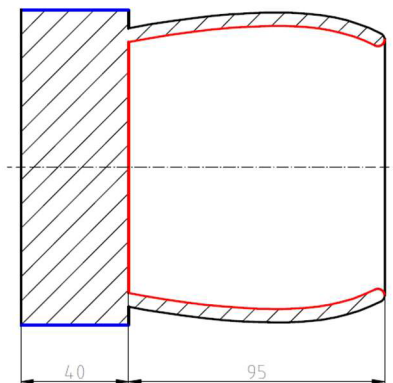
Obr. 3.14 První část soustružení vnější kontury.

Vzhledem k hodnotě přídavku 2 mm na maximálním vnějším průměru je rovnou používán dokončovací nástroj typu A, konkrétně CoroTurn PRIME CP-A11 s ISO značením CP-A1108-L3 4325. V první řadě by došlo k předobrobení a následoval by závěrečný dokončovací úběr. Konkrétní parametry uvádí tab. 4.1 s ohledem na limitní otáčky obou vřeten uvedených v příloze 1. K VBD je volen nástroj ISO CP-30AL-2525-11. Na základě CAD dat výrobce došlo k ověření, že nástroj nebude kolidovat s obráběnou konturou.

Tab. 3.4 Řezné parametry první operace.

	Počet úběrů	f_n [mm]	a_{pmin} [mm]	v_c [$m \cdot min^{-1}$]
předobrobení	10	0,320	0,800	275
dokončení	1	0,170	0,750	305

Při prvním upnutí by dále následovalo soustružení první části vnitřní kontury naznačené na obr. 3.15.



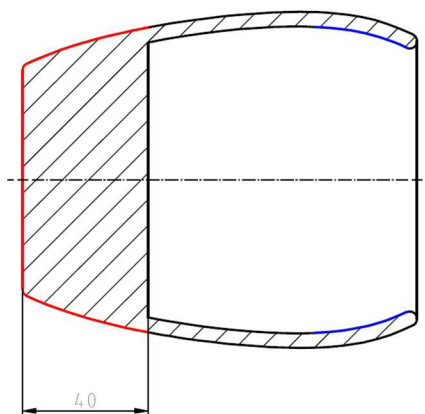
Obr. 3.15 První část soustružení vnitřní kontury.

Vlastnímu soustružení by předcházelo vrtání na průměr 84 mm. Dále by následovalo vnitřní soustružení VBD značenou VBMT 16 04 02-PF 1515 s použitím nástroje A25T-SVPBL 16. Opět došlo k ověření, že by v průběhu obrábění nedošlo ke kolizi mezi nástrojem a obrobkem.

Tab. 3.5 Řezné parametry druhé operace.

	Počet úběrů	f_n [mm]	a_{pmin} [mm]	v_c [$m \cdot min^{-1}$]
předobrobení	66	0,070	0,160	245
dokončení	1	0,090	0,070	245

Po obrobení pravé části obrobku by došlo k jeho upnutí do protivřeta. Již v úvodu popisování způsobu obrábění je zmíněno, že tvar součástky není z hlediska upnutí optimální. Z obr. 3.15 je patrné, že se na pravé straně obrobku nenachází žádná plocha vhodná pro upnutí pomocí standardních čelistí. Bylo by tedy nutné připravit speciální čelisti vhodné pro uvažovanou součást. Uvažovanou část plochy vhodnou pro upnutí ukazuje obr. 3.16 a je zvýrazněna opět modrou barvou.



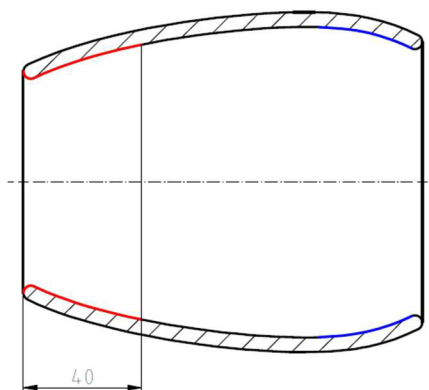
Obr. 3.16 Druhá část soustružení vnější kontury.

Ve zvýrazněném místě je výhodné zpětné zakřivení vnitřní dutiny, které může vyvolat přirozené vystředění obrobku při rozevírání čelistí. K výrobě takových čelistí by byly použity dxf soubory v přílohách 3 a 6. Červená část opět představuje obráběnou konturu. S přihlédnutím k většímu objemu obráběného materiálu by byly použity hodnoty řezných parametrů uvedené v tab. 3.6, které odpovídají nástrojům zvoleným pro první operaci.

Tab. 3.6 Řezné parametry třetí operace.

	Počet úběrů	f_n [mm]	a_{pmin} [mm]	v_c [$m \cdot min^{-1}$]
předobrobení	23	0,320	0,800	275
dokončení	1	0,170	0,750	279

Zbývalo by dokončit poslední druhou polovinu vnitřní kontury naznačenou na obr. 3.17. Byly by použity stejné nástroje jako v případě vnitřního soustružení na první upnutí a předvrtaný průměr by odpovídal hodnotě 68 mm.



Obr. 3.17 Druhá část soustružení vnitřní kontury.

Řezné parametry uvádí tab. 3.7.

Tab. 3.7 Řezné parametry čtvrté operace.

	Počet úběrů	f_n [mm]	a_{pmin} [mm]	v_c [$m \cdot min^{-1}$]
předobrobení	97	0,056	0,160	245
dokončení	1	0,064	0,064	245

ZÁVĚR

Řídicí systém Sinumerik 840D sl v rámci splajnové interpolace a aproximace nabízí široké možnosti v podobě A, B, C-splajnů a dále také umožňuje interpolaci obecného polynomu. Konkrétní charakteristika, možnosti a syntaxe patřičných funkcí je detailně popsána v 2. kapitole. Zde současně také došlo k odhalení licenčního omezení polynomičké interpolace, které bylo testováno u softwarových verzí SinuTrainu 840D sl 4.7 a 840D sl 4.8 a které bylo v případě vypracovávání závěrečné třetí kapitoly do jisté míry limitující, jelikož nebylo možné pozorovat vizuální rozdílnost ve srovnání se splajny.

Za neočekávanější cíle splajnové interpolace lze považovat vyšší kvalitu obráběné plochy, snížení obráběcího času a nižší namáhání CNC obráběcích strojů vlivem nárůstu plynulosti změny rychlosti, zrychlení a optimalizace změn směru nástroje. Zde lze doporučit práci s funkcemi jako SOFT a G642, které je možné kombinovat právě s používáním splajnů. Pozitivní efekt v tomto ohledu při práci s větším objemem dat nabízí také kompresory dat, které jsou opět blíže charakterizovány v 2. kapitole.

Z hlediska kvality výsledné plochy a optimalizace rychlosti nástroje nabízí konkurenční dodavatel řídicích systémů Heidenhain Cyklus 32, který hledá kompromis mezi tvarovou odchylkou a rychlostí nástroje. Aplikace výše uvedených možností má opodstatnění zejména u dlouhých NC kódů s velkým množstvím souřadnic.

Závěrečná 3. kapitola popisuje snahu o praktický výstup při aplikaci uvažované problematiky. Ideálním cílem bylo vytvořit funkční a odladěný program pro výrobu uvažované součástky, které odpovídá výkres v příloze 4, nebo případně v příloze 7, který by byl přímo použitelný na stroji Kovosvit Mas SP 280 SY. Ten však nebylo vlivem licenčních omezení popsaných v této kapitole možné realizovat do podoby odladěného a odsimulovaného programu.

Nejdříve se vyskytl problém s neimportováním splajnů v dxf souboru u softwaru Inventor Professional 2019 ve studentské verzi. Poté byly testovány i jiné softwary umožňující export v podobě dxf souboru, každopádně i v tomto případě byly výstupní soubory prakticky obtížně použitelné. U Inventoru 2022 došlo při importu dxf souboru včetně splajnu, každopádně došlo k deformaci kontury a i tento soubor by vyžadoval jistý editační zásah. Další možností byla úprava CAD dat tak, že nebudou obsahovat žádný splajn a ten bude proložen lineárními úseky, jelikož bylo patrné, že lineární úseky je možné importovat. Takto upravený dxf soubor byl skrze CAD Reader plně akceptovaný, každopádně získaná data po importu nebyla editovatelná a s přihlédnutím k tomu, že obsahovala příkazy G0, G1 a G3, nebylo možné aplikovat splajnovou aproximaci a interpolaci, protože obě varianty by byly příkazy G-skupiny v průběhu čtení dat ukončeny, jak je uvedeno v 2. kapitole. Tato data tedy bylo případně nutné exportovat a upravit ručně. Další možností bylo použití aproximační křivky získané pomocí proložení uzlových bodů vygenerovaných SinuTrainem, každopádně licenční omezení verzí 4.7 i 4.8 zamezovalo simulaci polynomičké interpolace.

V rámci naplnění cíle pojednávajícího o srovnání řídicího systému Sinumerik 840D také s možnostmi vybraných CAD/CAM softwarů byly pozorovány možnosti práce se splajny u softwaru PowerMill Ultimate 2021. V editoru křivek bylo možné vytvářet splajny pomocí uzlových bodů. Tímto způsobem byl interpolačně proložen dxf soubor odpovídající modelu_2 v příloze 6 a pomocí standardních nástrojů byla měřena odchylka od lineárních úseků. PowerMill tedy jistě možnosti práce se splajny nabízí. Ty se přibližují středním CAD softwarům typu Inventor apod. Nejširší paletu možností v oblasti práce se splajny nabízí z testovaných CAD softwarů Catia V5, která např. umožňuje editovat návaznosti křivek a zobrazovat křivostní analýzu.

V závěru práce je popsán přístup obrábění vnější kontury moderními nástroji, které náleží metodě PrimeTurning. Nástroj pro vnitřní soustružení byl volen s ohledem na geometrii součásti tak, aby nedošlo ke kolizi. To stejné platí i pro soustružení vnější kontury. K ověření dat došlo na základě CAD dat od výrobce Sandvik Coromant, který je poskytuje na svých webových stránkách. K předvrtání pro následné soustružení bylo přistupováno tak, aby byl vyvrtán co největší průměr. Je nutné si uvědomit, že tyto nástroje se řádově pohybují v desítkách tisíc korun a záleželo by na řadě faktorů, jak by k jejich aplikaci v konkrétní výrobě vzhledem k množství a požadavkům bylo přistupováno.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LINKEOVÁ, Ivana. *NURBS křivky: NeUniformní Racionální B-Spline křivky*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN ISBN978-80-01-03893-2.
- [2] KNICHAL, Vladimír, Alfons BAŠTA, Milan PIŠL a Karel REKTORYS. *Matematika II*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
- [3] NAJZAR, Karel. *Základy teorie splinů*. Praha: Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1287-9.
- [4] ŽÁRA, Jiří. *Moderní počítačová grafika*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0454-0.
- [5] MATOUŠEK, Ivo. *Počítačová grafika a CAD: základy geometrického modelování I*. V Liberci: Technická univerzita, 2015. ISBN ISBN978-80-7494-251-8.
- [6] KARGEROVÁ, Marie. *Geometrie a grafika pro CAD*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2680-9.
- [7] KUREŠ, Miroslav. *Normální křivka jako imperativní fenomén*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. Euroobčan 21. století. ISBN 80-720-4376-5.
- [8] RALSTON, Anthony. *Základy numerické matematiky: příručka pro university ČR*. Praha: Academia, 1973.
- [9] MAROŠ, Bohumil a Marie MAROŠOVÁ. *Základy numerické matematiky*. Vyd. 2. dopl. Brno: PC-DIR Real, 1999. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1494-4.
- [10] POLÁČEK, Jiří, Edita KOPINCOVÁ a František JEŽEK. *Počítačová grafika: určeno pro stud. fak. strojní*. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00537-2.
- [11] PARTSKHALADZE, George. *Počítačová grafika a design: distanční studijní opora*. Karviná: Slezská univerzita v Opavě, Obchodně podnikatelská fakulta v Karviné, 2005. ISBN 80-724-8315-3.
- [12] MSADDEK, El Bechir, Zoubeir BOUAZIZ, Maher BAILI a Gilles DESSEIN. Influence of interpolation type in high-speed machining (HSM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, 72(1-4), 289-302. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-5652-7
- [13] *SINUMERIK 840D/840Di/810D: Příručka programování*. 03/2004. 660 s.
- [14] *SINUMERIK 840D sl / 828D pro pokročilé: Programovací příručka*. 2010, s. 822.
- [15] *SINUMERIK 840D sl / 828D základy: Programovací příručka*. 2010, 588 s.
- [16] ADAMEC, Jaromír. *Programování CNC systému SINUMERIK 810D/840D - frézování*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1136-7.
- [17] *Simumerik Operate 2.7: vzdělávací a tréninkový modul pro podporu odborné komunikace o možnostech moderních CNC strojů*. Brno, 2012, 398 s.
- [18] *HEIDENHAIN iTNC 530: User's Manual HEIDENHAIN Conversational Programming*. 2010, 513 s.
- [19] *HEIDENHAIN iTNC 530: User's Manual HEIDENHAIN Conversational Programming*. 2005, 689 s.
- [20] SP 280. *KOVOSVIT MAS: machine your future* [online]. 2016 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/sp-280-p6.html#features>

- [21] *SP Line: Číslicově řízené soustruhy 280* [online]. 12 s. Dostupné také z: <https://www.kovosvit.cz/sp-280-p6.html#files>. Ke stažení na uvedeném odkazu.
- [22] SP 280: Technické parametry. *KOVOSVIT MAS: machine your future* [online]. 2016 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/sp-280-p6.html#technicaldata>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
2D	dvoudimenzionální prostor
3D	trojdimenzionální prostor
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
NC	Numerical Control
TCPM	Tool Center Point Management
VBD	vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A	[-]	bod definující úsečku AB (str. 14)
		název rotační osy
A2	[-]	adresa Eulerova úhlu
A3	[-]	adresa směrového vektoru
ASPLINE	[-]	funkce vyvolávající proložení bodů pomocí A-splajn interpolace
AB	[-]	úsečka vymezena body A a B (str. 14)
\overline{AB}	[-]	tečný vektor úsečky AB (str. 14)
B	[-]	bod definující úsečku AB (str. 14)
		název rotační osy
$B_i^n(t)$	[-]	Bernsteinův polynom n-tého řádu
B2	[-]	adresa Eulerova úhlu
B3	[-]	adresa směrového vektoru
BAUTO	[-]	definice prvního splajnového úseku prostřednictvím následujících 3 bodů
BNAT	[-]	přirozený přechod na první splajnový blok
BRISK	[-]	Funkce skokových změn zrychlení po dráze
BSPLINE	[-]	funkce vyvolávající proložení bodů pomocí A-splajn interpolace
BTAN	[-]	tangenciální přechod na první splajnový blok
C	[-]	bod definující úsečku CD (str. 14)

		matice obsahující členy parametrických rovnic (str. 17)
		název rotační osy
C^k	[-]	parametrická spojitost k-tého řádu
C2	[-]	adresa Eulerova úhlu
C3	[-]	adresa směrového vektoru
CD	[-]	úsečka vymezena body C a D (str. 14)
\vec{CD}	[-]	tečný vektor úsečky CD (str. 14)
COMPCAD	[-]	funkce aktivování kompresoru (optimalizovaná jakost povrchu u programů typu CAD)
COMPCURV	[-]	funkce aktivování kompresoru (polynomy s konstantním zakřivením)
COMPOF	[-]	funkce deaktivování kompresoru
COMPON	[-]	Funkce aktivování kompresoru
CSPLINE	[-]	funkce vyvolávající proložení bodů pomocí C-splajn interpolace
D	[-]	bod definující úsečku CD (str. 14)
EAUTO	[-]	definice posledního splajnového úseku prostřednictvím posledních 3 bodů
ENAT	[-]	přirozený přechod na následující blok posuvu
ETAN	[-]	tangenciální křivkový přechod na následující blok posuvu na začátku splajnu
F	[-]	obecná funkce
		příkaz hodnoty posuvu
G	[-]	obecná funkce (str. 10)
		vektor geometrických podmínek (str. 17)
G0	[-]	příkaz lineární interpolace rychlým posuvem
G1	[-]	příkaz lineární interpolace s pracovním posuvem
G17	[-]	příkaz volby pracovní roviny XY
G18	[-]	příkaz volby pracovní roviny XZ
G54	[-]	1. nastavitelné posunutí počátku
G64	[-]	příkaz režimu řízení pohybu po dráze
G642	[-]	Příkaz režimu řízení pohybu po dráze s přechodovými zaobleními při dodržení definovaných tolerancí
G_n	[-]	člen vektoru geometrických podmínek

G^k	[-]	geometrická spojitost k-tého řádu
I	[-]	obor parametrizace funkce
M	[-]	bázová matice
M3	[-]	Příkaz otáčení vřetena ve směru hodinových ručiček
M6	[-]	příkaz výměny nástroje
M30	[-]	příkaz ukončení programu
M128	[-]	funkce chování řídicího systému při polohování os natočení
N	[-]	obor přirozených čísel
		vedlejší blok (zahrnuje číslo, např. N20)
$P(u)$	[-]	rovnice tečny
P_1	[-]	řídící body Beziérový kubiky
PW	[-]	váha uzlového bodu v případě B-splajnu
$Q(t)$	[-]	bodová rovnice křivky – bod (str. 11)
$Q(t)$	[-]	křivka nebo segment křivky označený dolním indexem, případně se vyskytuje s parametrem u a v (str. 12 – 19)
$Q_n(t)$	[-]	polynomiální křivka
R	[-]	obor reálných čísel
S	[-]	příkaz otáček vřetena
		odchylka od kontury
SD	[-]	stupeň B-splajnu
SOFT	[-]	funkce konstantního zrychlení po dráze
SW 5, SW 6	[-]	softwarové verze řídicího systému pracující na stroji
T	[-]	vektor obsahující parametry parametrických rovnic (str. 17)
		příkaz vyvolávající nástroj
		toleranční parametr cyklu 32
TCPM (funkce)	[-]	funkce chování řídicího systému při polohování os natočení (další vývoj M128)
TRAFOOF	[-]	funkce vypnutí aktivních transformací v kanálu
TRAORI	[-]	čtyř a pětiosá transformace, generická transformace
X	[-]	Název translační osy
Y	[-]	název translační osy

Z	[-]	název translační osy
a	[-]	x souřadnice bodu α v kartézském souřadném systému
a_n	[-]	člen polynomiální křivky
a_x	[-]	člen parametrické rovnice
b	[-]	y souřadnice bodu α v kartézském souřadném systému
b_x	[-]	člen parametrické rovnice
c_x	[-]	člen parametrické rovnice
d_x	[-]	člen parametrické rovnice
k	[-]	souvislá podmnožina reprezentující křivku
m	[-]	x souřadnice bodu v v kartézském souřadném systému
m_{nm}	[-]	člen báze matice
n	[-]	y souřadnice bodu v v kartézském souřadném systému
		exponent polynomiální křivky
		obecná proměnná reprezentující dimenzi prostoru
p	[-]	parametr reprezentující vzdálenost ohniska od řídicí přímky
$\vec{p}(t)$	[-]	vektor definovaný řídicími body Beziérový kubiky
pl	[-]	Power Line – starší vývojová verze řídicího systému Sinumerik
$\vec{q}(t)$	[-]	polohový vektor
$\vec{q}'(t)$	[-]	tečný vektor
r	[-]	poloměr
sl	[-]	Solution Line – starší vývojová verze řídicího systému Sinumerik
t	[-]	parametr křivek a rovnic (str. 10-19)
u	[-]	parametr rovnice tečny (str. 12)
		parametr segmentu polynomiální křivky (str. 13)
v	[-]	parametr segmentu polynomiální křivky (str. 13)
x	[-]	označení osy kartézského souřadného systému nebo obecné proměnné náležící této ose
xⁿ	[-]	parametr polynomu
y	[-]	označení osy kartézského souřadného systému nebo obecné proměnné náležící této ose

z	[-]	označení osy kartézského souřadného systému nebo obecné proměnné náležící této ose
α	[-]	bod

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	technický popis soustružnického centra Kovošvit Mas SP 280 SY
Příloha 2	CAD model (model_1)
Příloha 3	dxf soubor (model_1)
Příloha 4	výkres (model_1)
Příloha 5	CAD model (model_2)
Příloha 6	dxf soubor (model_2)
Příloha 7	výkres (model_2)
Příloha 8	1. soustružená kontura (model_2_krivka_1)
Příloha 9	2. soustružená kontura (model_2_krivka_2)
Příloha 10	3. soustružená kontura (model_2_krivka_3)
Příloha 11	4. soustružená kontura (model_2_krivka_4)

