

Vývoj metody inprocesního měření dotykovou sondou na pětiosém CNC stroji

Filip Kasík, Petr Vavruška

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, Horská 3 128 00 Praha 2, Česká republika

Abstrakt

Cílem práce je vyvinout metodu pro zvýšení efektivity výrobního procesu dílce pomocí kontroly vyrobených dílců přímo na obráběcím stroji. Standardní výrobní proces se skládá z obrábění na stroji a následně kontroly přesnosti dílce. V některých případech lze následně provést opravné obrábění na základě naměřených dat. Proto je vhodné využít princip, který je založený na průběžné kontrole obráběných součástek a který je ve strojírenské praxi nazývaný jako inprocesní měření. Využití inprocesního měření, které vede především k úspoře času výrobního procesu, je proto základem vyvíjené metody určené pro pětiosé frézovací centrum KOVO-SVIT MAS MCU 700V[TJ]-5X s řídicím systémem TNC 640 HEIDENHAIN, vybaveným novým měřicím Cyklem 444 pro měření ploch volného tvaru. Práce se zabývá principy fungování dotykových sond, plánováním metrologických drah v CAD/CAM systému Siemens NX, provedením měření obrobených ploch na stroji a následným vyhodnocením naměřených dat. Metoda je základem pro generování nového obrábění, jehož cílem je opravit chyby z prvotní výroby.

Klíčová slova: Inprocesní měření, dotyková sonda, měření obrobků

1 Úvod

V současném rychlém vývoji strojírenského průmyslu hledají výrobci stále nové metody, jak vyrábět dílce ve stále se zvyšující přesnosti a zároveň ve zkracujících se dodacích lhůtách. Výrobní firmy jsou nuceny zefektivňovat výrobu za účelem produkce co možná nejvyššího počtu obrobků v nejkratším možném čase.

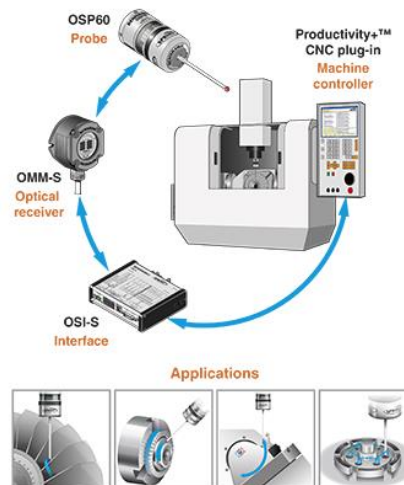
1.1 Inprocesní měření

Jednou z možností zvýšení efektivity výroby je redukování počtu typů strojů, na nichž výroba probíhá. Technologie obrábění je specifická svou vysokou přesností i při výrobě tvarově složitých dílců. Celý proces od polotovaru k hotovému výrobku spočívá v obrábění na obráběcím stroji a následném kontrolním přeměření hotového dílce na speciálním souřadnicovém měřicím stroji (zkr. CMM). V případě zjištěných nesrovnalostí od tvaru požadovaného modelu však již není možné chyby odstranit, protože není možné upnout dílec zpět do obráběcího centra stejně přesně, jako při první výrobě. [1]

Z tohoto důvodu se v současnosti stále více rozšiřuje trend tzv. inprocesního měření, kdy je obrobený dílec změřen na stejném stroji a při stejném upnutí, jako byl vyroben. Běžné obráběcí stroje využívají dotykových sond výhradně k nastavení pozic obrobků či nástrojů. Pro aplikace inprocesního měření však lze využít pouze obráběcí centra, která mají ve svém řídicím systému naprogramovány i funkce pro komplexnější měření obrobených ploch dotykovou sondou (např. různé měřicí cykly). [2]

Hlavním světovým představitelem vývoje inprocesního měření je britská společnost Renishaw, která se zaměřuje na vysoce přesné měření dotykovými sondami.

Renishaw vyvinula systém SPRINT, který v průběhu procesu obrábění měří obrobené plochy a následně zpracovává změřená data přímo v řídicím systému stroje.



Obr. 1.1 Systém SPRINT společnosti Renishaw [3]

Zásadní výhodou systému SPRINT spočívá v tom, že systém dokáže pracovat zcela samostatně, jelikož na základě naměřených dat automaticky přepočítává dráhy obráběcího stroje, kterými dojde k opravení změřených chyb. Systém dokáže fungovat jen se specifickými komponenty tedy dotykovou sondou, přijímačem, komunikační jednotkou, a hlavně se softwarem instalovaným přímo do řídicího systému, který zajišťuje úpravu NC programu podle naměřených dat sondy přímo v řídicím systému stroje. [4]

Vývojem inprocesního měření se však zabývají i jiní výrobci. Například továrna obráběcích strojů TOS Varnsdorf řešila problém integrací metrologického programu

* Kontakt na autora: Filip.Kasik@fs.cvut.cz

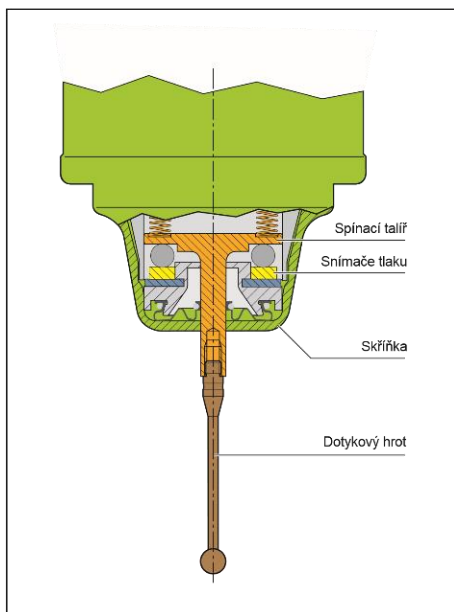
TouchDMIS do obráběcího stroje. Úprava obrábění spočívá v přepočítání nových drah pomocí kompenzačních tabulek v řídicím systému stroje. [5]

Dalším typem přímé kontroly výroby pomocí naměřených dat je úprava 3D modelu v CAD softwaru a následné vygenerování nového NC programu, jehož úkolem je opravit vzniklé chyby z prvotního obrábění. [6]

Právě na poslední zmíněnou variantu se tato práce zaměřuje. Nejprve budou představeny principy fungování a typy dotykových sond, následně možnosti programování metrologických drah v programu Siemens NX, a nakonec možnosti nového měřicího Cyklu 444 v řídicím systému TNC 640 HEIDENHAIN instalovaného na obráběcím stroji KOVOSVIT MAS MCU 700V[T]-5X, pro který byla metoda vyvíjena.

1.2 Dotykové sondy

Strojírenská metrologie rozlišuje dva základní typy sond – kontaktní a nekontaktní. Nkontaktní sondy jsou založeny na vysílání optických signálů a jejich odrazem od obrobku jsou měřeny body na povrchu dílce. Přesnější jsou však sondy dotykové, které fungují na přímém kontaktu hrotu sondy s obrobkem. Když se sonda dotkne měřené plochy, naměřená hodnota se nezaznamená okamžitě. Je nutné vychýlení hrotu sondy, čímž se vytvoří elektrický signál, který je v řídicím systému přepočítán na změřené souřadnice bodu. Hrot je zpravidla pevně spojen se spínacím talířem, který je uložen v tělese sondy, jak je vidět na obrázku 1.2. [7]

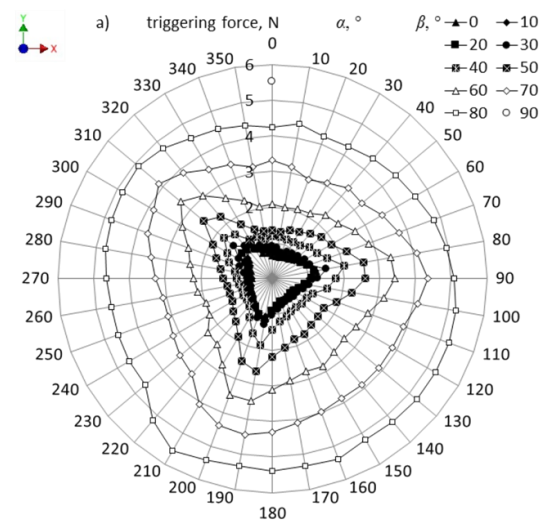


Obr. 1.2 Konstrukce dotykové sondy HEIDENHAIN [7]

Vychýlením dotykového hrotu dojde zároveň k vychýlení talíře, které je měřeno různými způsoby. Na obrázku 1.2 je ukázán princip, kdy je snímací talíř uložen na tlakových snímačích, které jsou rovnoměrně rozprostřeny po obvodu. Síla na hrot při dotyku s obrobkem způsobí vychýlení talíře a ten tlačí na snímač, dokud se nesepe. Dalším principem je využití optického paprsku, procházejícího kolmo na osu hrotu. V rovnovážné pozici prochází paprsek rovně skrz dřík a je snímán na druhé straně tělesa

sondy. Při vychýlení je sepnutí signálu rozpoznáno změnou směru paprsku po průchodu nakloněného dříku.

Přesnost měření dotykovou sondou ovlivňuje uložení talíře v sondě. Na obrázku 1.2 byl ukázán princip po obvodu rovnoměrného rozložení tlakových snímačů, na nichž je talíř posazen. Při použití optického principu se využívá třibodového uložení, které zajišťuje ideální stabilitu. [7] Negativní efekt třibodového principu je nestejnoměrná spínací síla v různých směrech měření. Byly provedeny experimenty, které potvrzují, že třibodové uložení snímacího talíře výrazně ovlivňuje velikost síly nutné k sepnutí signálu. Na obrázku 1.3 je vidět diagram z testování velikosti spínací síly provedené společností Renishaw. Odlišná tuhost v různých směrech způsobuje rozdílnou sílu, kterou sonda musí tlačít na obrobek a například u tenkostěnných dílců může vést i k deformaci vyrobené součásti. [8]



Obr. 1.3 Charakteristika spínací síly dotykových sond Renishaw [9]

Z důvodu nekonstantní spínací síly byla vynalezena i další možnost konstrukce dotykových sond, a to je využití tenzometrie. Hrot i talíř jsou v sondě pevně uchyceny a dotykem s dílcem dojde k materiálové deformaci talíře, na kterém je upevněn tenzometrický pásek. Změnou tvaru talíře se pásek deformuje a vzniká elektrický signál, který zajistí sepnutí sondy. [10]

Konstrukce dotykových sond výrazně ovlivňuje měření kontrolovaných dílců. Při plánování měřících operací je třeba brát ohled na možnosti používaného nástroje a na princip, na kterém sonda pracuje.

2 Možnosti softwaru Siemens NX

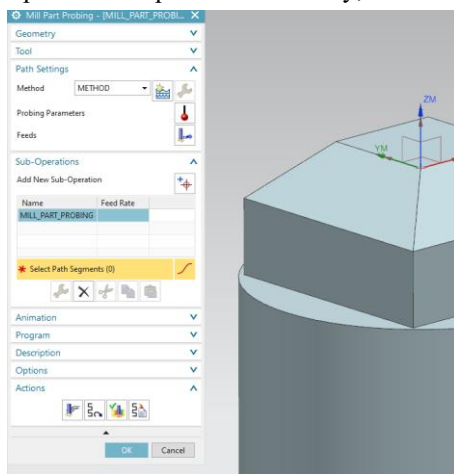
Společnost Siemens nabízí ve svém plnohodnotném CAD/CAM softwaru NX kromě modelování a programování obrábění také metrologické funkce. Poskytují široké možnosti pro nastavování měřících operací na souřadnicových měřících stojích i přímo na obráběcích centrech. Možnosti, kde lze v NX naprogramovat dráhy měřících sond jsou dvě. Přímou v CAM prostředí programu je nabízen typ operace *Probing*, kde je možno manuálně vybrat libovolné měřené body. Siemens nabízí i samostatné prostředí *Inspection*, ve kterém můžou být vygenerovány

kompletní měřicí programy i pro tvarově složité dílce. [11]

2.1 Operace *Probing*

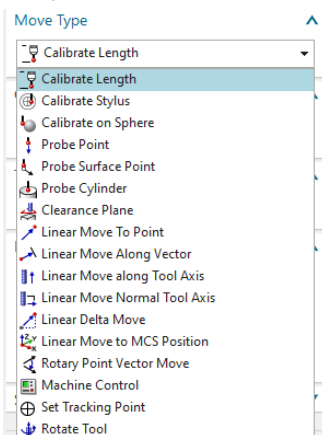
Cílem technologa je co nejvíce zautomatizovat výrobu a zproduktivnit využití času výroby na stroji. Za tímto účelem lze i dílčí úkony (jako je např. nastavení souřadného systému obrábku) předem připravit společně s programováním obrábění. Operace *Probing* nabízí i možnost mezioperačního měření obráběných součástí ve stejné formě jako operace s obráběním. Funkci *Probing* lze využít ve frézovací i soustružnické technologii, a to jak pro měření dílců, tak nástrojů.

Pro potřeby této práce bylo představeno měření dílců v průběhu frézování – *Mill Part Probing*. Okno operace se velmi podobá těm pro obráběcí dráhy, viz obrázek 2.1.



Obr. 2.1 Okno operace *Probing*

V úvodu je nutné specifikovat geometrii, která se bude měřit, a použitý nástroj – dotkovou sondu. Dále je třeba definovat různé parametry snímání jako jsou bezpečné vzdálenosti, tolerance pohybu nebo rychlosti měření včetně příjezdů či odjezdů. Samotné typy drah lze nalézt v sekci podoperace, kde je na výběr z následujících možností (obrázek 2.2).



Obr. 2.2 Typy podoperací funkce *Probing*

První tři typy slouží pouze ke kalibraci kuličky sondy. Ty následující vytvářejí přímo dráhy nástroje a lze je rozdělit na dva typy pohybů – měřicí a přejezdové. První zmí-

něné provádí samotný pohyb nástroje při měření definovaných prvků. To mohou být obecně definované body, body na konkrétním povrchu nebo válcové plochy.

Za přejezdové jsou považovány podoperace, které plní pouze transformační pohyb, tedy přesun bez provádění měření. Směr pohybu může být definován pomocí souřadnice koncového bodu, zadané vzdálenosti a směru vektoru nebo směru osy nástroje, nebo pomocí vzdáleností v jednotlivých složkách kartézského systému (ΔX , ΔY , ΔZ).

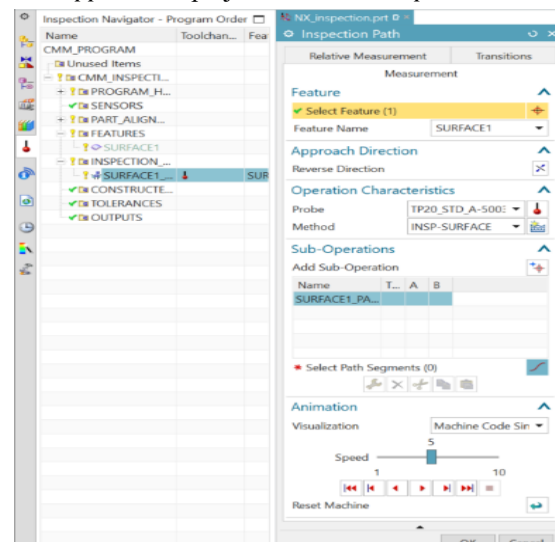
Operace *Probing* nabízí značné množství typů pohybů jak měřicích, tak přejezdových, ovšem jedná se pouze o samostatné podoperace, a nikoliv o ucelený měřicí program. Návnost jednotlivých měření určuje pouze pořadí jednotlivě vytvořených podoperací programátorem. [11]

2.2 Prostředí *NX Inspection*

Na rozdíl od předchozí operace *Probing*, programovací prostředí Siemens NX *Inspection* nabízí možnost tvorby komplexního metrologického programu v daleko provázanějších krocích. *Inspection* modul je určen pro plánování, simulaci a generování měřicích NC programů pro souřadnicové měřicí stroje. Prostředí umožňuje definovat kromě bodů, hran, oblouků či kruhových otvorů i složitější měřené tvary jako jsou roviny, válce, kužele až po kulové či obecně tvarové plochy a křivky. Pro každý z uvedených měřených objektů byl vyvinut speciální typ měřicí operace, jejíž přednastavené pohyby nástroje umožňují změřit objekt co nejvhodněji. [12]

2.2.1 Operace *Inspection path*

Výroba složitých tvarových prvků, jako například loptkových kol, vyžaduje značnou náročnost jak při obrábění, tak i při jejich kontrole. Při zakládání nového měřicího souboru v NX *Inspection* je třeba rozlišit, jestli soubor s modelem, který bude měřen, již obsahuje obráběcí proces či nikoliv. Pokud ne, tak lze jednoduše v horní liště v kartě *Application* přejít do rozhraní *Inspection*.



Obr. 2.3 Dialogové okno operace *Inspection path*

Jestliže soubor již obsahuje obráběcí operace, tak je nutné vytvořit nový měřicí soubor s odkazem na měřený dílec. Začátek měření lze provést ikonou *Inspection path*, přičemž je zobrazeno okno měřicí operace (obrázek 2.3).

Jako první je v operaci *Inspection path* požadován výběr měřeného prvku, který je předem definován příkazem *Insert*, jehož možnosti jsou na obrázku 2.4.

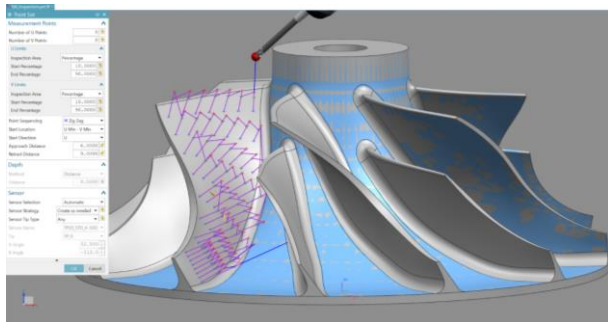


Obr. 2.4 Výběr měřeného prvku

Dále je v okně operace možnost výběru typu dotykové sondy a použité měřicí metody. Pro aplikaci na měření lopatkových kol, kde je tvar jednotlivých lopatek velmi geometricky složitý, je nevhodnější definovat měřenou plochu lopatky jako *Surface* a použítou metodu zvolit *Insp-Surface*. Po této fázi obecného nastavení již zbývá přejít k naprogramování pohybů nástroje. [12]

2.2.2 Podoperace *Point set*

Konkrétní typ trajektorií, kterými bude sonda provádět kontrolu dílce, udává typ zvolené podoperace. Kromě měření jednotlivých bodů a skenování oblouků a křivek, nabízí NX i podoperaci *Point Set*. Její praktické využití spočívá v tom, že na povrchu obecné plochy je vytvořena rovnoměrně rozprostřená síť bodů, které budou měřeny. Hustota sítě je definována počtem bodů ve dvou na sebe kolmých směrech U a V, které jsou vygenerovány na povrchu plochy, viz obrázek 2.5. Síť může sahát až po okraj měřené plochy nebo ji lze nechat odsadit o absolutní nebo relativní vzdálenost od okraje pomocí definice *U/V Limits*.



Obr. 2.5 Síť bodů vygenerovaná podoperací *Point Set*

Možnosti podoperace *Point Set* pokračují v určení propojení předem vytvořených bodů. Návaznost jednotlivých bodů lze definovat strategií *Zig*, která proměří postupně všechny body v jedné řadě (v jednom směru U nebo V) a následně přejede zpět na začátek další řady. Dráha strategie *Zig-Zag* je shodná s tím rozdílem, že na konci první řady začne měřit hned body z řady následující v opačném směru. Poslední možností je *Nearest*, která se vždy po měření jednoho bodu přesune k následně nejbližšímu bodu sítě.

Při měření hůře přístupných objektů jako je například spodní plocha lopatky z obrázku 2.5, je velmi důležité hlídat případnou kolizi dotykové sondy s dílcem. Jelikož při

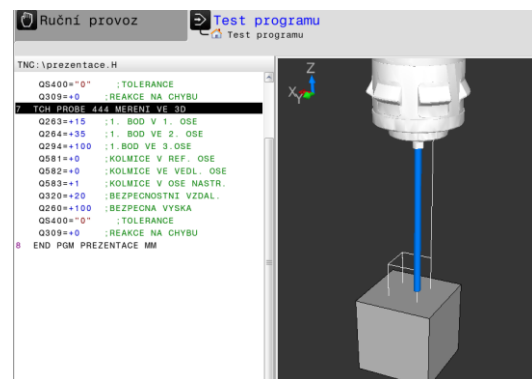
jezd k měřeným bodům probíhá vždy po normále, nastavením lze ovlivnit příjezdovou a odjezdovou vzdálenost od místa měření (*Approach/Retract Distance*). Dotyková sonda se z aktuální pozice pohybuje do bodu, který je vypočítán z příjezdové vzdálenosti a z normály k povrchu, na kterém měřený bod leží. Zde nastává přímý proces měření a při doteku, přesněji po sepnutí, se vrací zpět (opět ve směru normály) do odjezdové vzdálenosti. Odtud se pak pohybuje nejkratší cestou do příjezdové vzdálenosti nad následujícím měřeným bodem.

Posledním možností, kterou nastavení podoperace *Point Set* nabízí, je sklopení osy dotykové sondy. Provádí se pomocí dvou úhlů A a B, které otáčejí sondu kolem dvou strojních úhlů. Naklápění sondy má však své limity. Úhly lze měnit jen v rozsahu 7,5 stupně, což je dáno konstrukcí dotykových sond. Při plánování pohybů měřicího nástroje je tak důležité s tímto omezením počítat.

Po dokončení podoperace lze také přesně definovat místo a směr počátečního příjezdu i koncového odjezdu od kontrolované plochy, a naplánovat tak i provázanost jednotlivých použitých operací mezi sebou. Následuje možnost prohlédnout si celou operaci pomocí vytvořené animace. [12]

3 Měřicí Cyklus 444 HEIDENHAIN

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1 o inprocesním měření, existují obráběcí stroje, které jsou vybaveny přesnými měřicími funkcemi. Německá společnost HEIDENHAIN představila ve svém řídicím systému TNC 640 nový cyklus pro měření ploch volného tvaru – Cyklus 444. Měřicí postup probíhá velmi podobně, jako v případě drah v NX *Inspection*, který byl popsán v předchozí kapitole. Vstupními hodnotami do Cyklu 444 je trojice souřadnic měřeného bodu (X, Y, Z) a odpovídající hodnoty dílčích složek normálového vektoru plochy, jež je měřena. Rovněž jsou požadovány dvě vzdálenosti (*Bezpečná vzdálenost* a *Bezpečná výška*), hodnota dovolené tolerance a reakce na případ, kdy je změřená hodnota mimo toleranční pásmo. Ukázka, jak Cyklus 444 vypadá je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Ukázka programu s měřicím Cyklem 444 ve stanici TNC 640 HEIDENHAIN

Kulička se z aktuální pozice pohybuje nejkratší cestou do místa vzdáleného od měřeného bodu o *Bezpečnou vzdálenost* ve směru daným normálou. Poté sonda pokračuje samotným procesem měření. Pohybuje se směrem k měřenému bodu a čeká, až se při kontaktu s obrobkem vyvine dostatečně velká síla potřebná k sepnutí signálu.

Dráha odjezdu je shodná s dráhou příjezdu a jakmile dosáhne místa, definovaného *Bezpečnou vzdáleností*, pokračuje odjezdem ve strojní ose Z do *Bezpečné výšky* nad celý obrobek.

Opět zde však nastává problém v případě měření hůře přístupných oblastí. Při zmíněném typu dráhy by mohlo dojít tomu, že by část obrobku byla v případě odjezdu nad sondou, což by vedlo ke kolizi nástroje s dílcem. Tomu lze zabránit tak, že bude hodnota *Bezpečné výšky* rovna souřadnici Z místa, do kterého sonda odjíždí po změřeném bodu (totéž místo, ze kterého sonda začíná měření). Zmíněnou úpravou a přidáním příkazu lineárního přejezdu do místa nad další měřený bod již nedochází k výjezdu do *Bezpečné výšky* nad obrobek, čímž se sníží riziko kolize při měření bodů, které jsou špatně dostupné. [13]

3.1 Export naměřených dat z TNC 640

Řídicí systém HEIDENHAIN je vybaven vysokým počtem uživatelských proměnných. Nazývají se Q-parametry a jedná se o proměnné, do nichž lze ukládat hodnoty v průběhu vytváření programu. Zmíněný Cyklus 444 využívá vyhrazené Q-parametry pro uložení naměřených hodnot jako jsou souřadnice bodu (X, Y, Z), odchylky od požadovaných hodnot souřadnic, celková tzv. 3D odchylka a vyhodnocení měření.

Jelikož je však pro každý měřený bod třeba vytvořit samostatný Cyklus 444, je nutné za každým cyklem nechat naměřené parametry vypsat. V TNC 640 lze data, uložená do Q-parametrů, exportovat pomocí funkce FN 16: F-PRINT. Předem musí být připravena struktura textového souboru s odkazem na konkrétní Q-parametry. Po tom, co Cyklus 444 proběhne, data se uloží do zmíněných proměnných a za cyklem je zadána funkce FN 16. Proběhne vytvoření nového textového souboru, který je ukázán na obrázku 3.2. Je prakticky totožný až na to, že odkazy na požadované Q-parametry jsou nahrazeny přímo číselnou naměřenou hodnotou. [14]

Bod číslo:	1
Datum:	9- 2-2021
Cas:	18:36:32
Pozadovana hodnota x:	21.840
Namerena hodnota x:	21.840
Pozadovana hodnota y:	5.460
Namerena hodnota y:	5.459
Pozadovana hodnota z:	0.000
Namerena hodnota z:	0.019
Odchylka x :	0.000
Odchylka y :	-0.001
Odchylka z :	0.019
3D odchylka:	0.019
STATUS:	-1

Obr. 3.2 Ukázka výstupního souboru z měření při použití funkce FN 16: F-PRINT

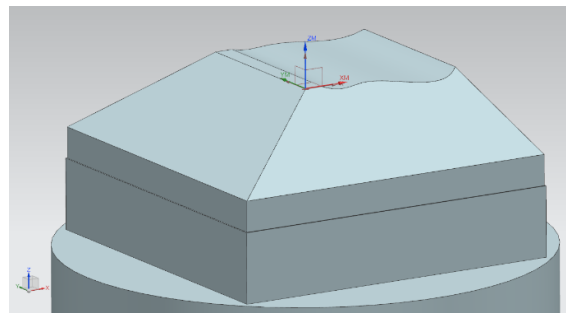
4 Návrh a experimentální ověření metody inprocesního měření

Možnosti aplikace inprocesního měření byly představeny v kapitole 1.1. Cílem této práce je vyvinout typ metody mezioperačního kontroly obráběcího procesu na pětiosém frézovacím centru KOVOSVIT MAS MCU 700V[T]-5X se zmíněným řídicím systémem TNC 640 HEIDENHAIN. Jelikož implementace systému SPRINT

od společnosti Renishaw není do řídicího systému HEIDENHAIN možná, práce využívá principu opravy CAD modelu dílce po jeho změřením. K tomu byly využity dostupné prostředky, které byly představeny v předchozích kapitolách. Postup při sestavování metody začíná naprogramováním metrologických drah měřicího nástroje v prostředí Siemens NX *Inspection*. Pro aplikaci na zmíněném frézovacím centru bylo zapotřebí získat hodnoty z programu NX a vygenerovat je do podoby NC programu sestaveného z Cyklů 444 (vždy jeden cyklus pro každý měřený bod). K této transformaci byl využit postprocessor, který v NX slouží ke generování měřicích programů pro souřadnicové měřicí stroje a který byl patřičně upraven tak, aby mohl být výsledný vygenerovaný NC program odbaven na obráběcím stroji. Export naměřených dat byl proveden způsobem, který je vysvětlen v kapitole 3.1.

4.1 Návrh experimentu

Pro ověření funkčnosti navržené metody byly navrženy dva dílce, které byly nejprve obrobena a následně na změřeny na zmíněném stroji MCU 700 pomocí dotykové sondy TS 460 HEIDENHAIN. Jelikož se jedná o obrobkovou sondu, bylo zapotřebí ověřit správnost jejího měření opakováním kontroly na souřadnicovém měřicím stroji Universal COORD3. První model je sestaven pouze z rovinných ploch s různým naklopením, na vrchní ploše druhého pak byla vyfrézována tvarová plocha (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Model s tvarovou plochou

Měření obou sešikmených ploch proběhlo vždy dvěma způsoby. Nejprve sonda přijížděla k bodu se svou osou ponechanou ve strojní ose Z. Následně proběhlo měření shodných bodů s osou sondy sklopenou do směru normály dané plochy (plochy byly navrženy tak, aby jejich normála byla odchýlena od osy Z v násobcích 7,5 stupně – v uvedeném případě byly plochy sklopeny o 15 stupňů).

5 Výsledky měření

Obrábění a měření proběhlo podle návrhu z kapitoly 4.1 nejprve na MCU 700 a poté na stroji Universal COORD3. Výsledky měření tvarové plochy jsou v následující tabulce 5.1 prezentovány celkovou 3D odchylkou. Sloupec s červeným nadpisem označuje hodnoty ze stroje MCU 700, oranžový nadpis pak měření na stroji COORD3. Chyby v obrábění se pohybují v řádu desetin milimetru a byly způsobeny chybným nastavením korrekce nástroje. Pro potřeby této práce však nejsou předmětem analýzy. Pro porovnání zaznamenaných hodnot byl vypočítán rozdíl mezi 3D odchylkami z obou strojů. Jejich aritmetickým průměrem bylo určeno, že průměrný

rozdíl v měření obou strojů je 5,8 μm . Vzhledem ke katalogové přesnosti použité sondy TS 460, která je dána jako 5 μm , lze zhodnotit, že měření na obráběcím stroji je s porovnáním se speciálním měřicím strojem velmi přesné.

Tab. 5.1 Naměřené hodnoty tvarové plochy

Měřená plocha	ČÍSLO BODU	MCU 700	Universal COORD3	Rozdíl 3D odchylek
P1_SPLINE	1	-0.1246	-0.1142	-0.0122
	2	-0.1246	-0.1150	-0.0114
	3	-0.1188	-0.1107	-0.0098
	4	-0.1214	-0.1197	-0.0019
	5	-0.1259	-0.1229	-0.0032
	6	-0.1298	-0.1249	-0.0051
	7	-0.1265	-0.1199	-0.0073
	8	-0.1260	-0.1189	-0.0078
	9	-0.1179	-0.1139	-0.0046
	10	-0.1096	-0.1070	-0.0026
	11	-0.1152	-0.1105	-0.0047
	12	-0.1196	-0.1128	-0.0068
	13	-0.1310	-0.1243	-0.0069
	14	-0.1302	-0.1235	-0.0068
	15	-0.1241	-0.1202	-0.0041

Následující tabulka 5.2 slouží k porovnání dvou způsobů měření hlavně na stroji MCU 700. V porovnání s měřením na speciálním měřicím stroji pak bylo prokázáno, že přesněji proběhlo měření s osou sondy sklopenou ve směru normály k měřenému povrchu, ovšem s velmi malým rozdílem.

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty šikmé rovinné plochy

Měřená plocha	ČÍSLO BODU	MCU 700	Průměr hodnot	Universal COORD3	Průměr hodnot
P2_SIKMA-A_OSA-Z	16	-0.1021	-0.1017	-0.0834	-0.0855
	17	-0.1018		-0.0826	
	18	-0.1014		-0.0858	
	19	-0.1026		-0.0864	
	20	-0.1005		-0.0891	
P2_SIKMA-A_NOR-MALA	21	-0.0863	-0.0870	-0.0820	-0.0844
	22	-0.0864		-0.0817	
	23	-0.0874		-0.0849	
	24	-0.0873		-0.0851	
	25	-0.0875		-0.0882	

Při měření šikmé plochy s osou sondy ve strojní ose Z byl vlivem vyšší spínací síly sondy pozorován skluz dotykové kuličky po povrchu dílce, než došlo k sepnutí signálu. Tento jev byl velmi dobře viditelný, avšak uvedené výsledky ukazují, že naměřené hodnoty obou způsobů se liší jen velmi málo. Z rozdílu uvedených průměrů lze konstatovat, že metody se liší o 14,7 μm .

6 Závěr

V této práci byly představeny prostředky pro vývoj metody mezioperačního měření přímo na obráběcím stroji. Zatímco operace *Probing* v Siemens NX je vhodná spíše pro manuální nastavení jednotlivých pohybů měřicí sondy, prostředí NX *Inspection* nabízí možnost tvorby

komplexních metrologických operací pro měření i složitých tvarových ploch. Pomocí plánování v modulu *Inspection* a potřebných úprav postprocesoru bylo možné otestovat naprogramované dráhy dotykové sondy na dílci ihned po jeho obrobení. Výsledky z provedeného testu ukazují, že použitá dotyková sonda TS 460 poskytuje velmi přesná data, neboť se v porovnání se speciálním měřicím strojem liší pouze o 1 až 14 mikrometru. Naměřené hodnoty mohou být základem pro vytvoření náhradních ploch a následně nového obrábění, jehož úkolem by bylo odstranit vzniklé chyby při prvním obrábění.

Literatura

- [1] J. Zhu, Y. Gao. Review of the opaque coolant barrier removal techniques for in-process form profile optical measurement. Proc. SPIE 11053, Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation [online]. ISSN: 1105304. [vid. 7. 3. 2019]. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2517179>
- [2] Bozich, D. In-line probing for process improvement. Advanced Materials Research [online]. říjen 2006. číslo 45. stránky článku 52-56. [vid. 1. 11. 2020]. ISSN: 03609936.
- [3] EXPLORE THE SPRINT SYSTEM. In: Fantasia Machinery Co., Ltd. [online]. Fantasia Machinery, © 2010 [vid. 4. 1. 2021]. Dostupné z: [SPRINT™: MTM Toolkit RENISHAW \(fantasia.co.th\)](https://www.fantasiacmachinery.com/SPRINT%20MTM%20Toolkit%20RENISHAW)
- [4] Renishaw s.r.o. [online]. Snímací systémy pro CNC obráběcí stroje © 2001–2017 [vid. 21. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/sondy-a-software-pro-obrabeci-stroje--6073>
- [5] Vavruška, P. Strojirenský veletrh EMO 2019 Hannover. Automa – časopis pro automatizační techniku, s.r.o. [online]. Ročník 2020, číslo 1. [vid. 21. 11. 2020] Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/strojirensky-veletrh-emo-2019-hannover-2020_01_0_12715/
- [6] Huang, N., Yin, C., Liang, L. et al. Error compensation for machining of large thin-walled part with sculptured surface based on on-machine measurement. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. Ročník 2018, Číslo 96, stránky článku: 4345–4352. [vid. 21. 11. 2020]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1897-x>
- [7] HEIDENHAIN s.r.o. [online]. *Dotykové sondy pro obráběcí stroje*. © 2019. [vid. 8. 11. 2020]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/1113984-C2_Dotykov%C3%A9_sondy_cs.pdf
- [8] *Na špičce – průvodce výběrem doteku pro CMM* [online]. Renishaw plc., © 2001-2020. [vid. 11. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/na-spicece-pruvodce-vyberem-doteku-pro-cmm--10927>
- [9] A Wozniak, M Byszewski, M Jankowski. 3D characteristics of triggering force of CNC machine tool probe. *Journal of Physics: Conference Series*. Číslo 1065 [vid. 14. 11. 2020]. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/14/142014>
- [10] Rolenc, Martin. *Programové moduly automatického nastavení nástrojů u soustružnických center*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [11] Manufacturing Milling [online]. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., ©2020. [vid. 20. 4. 2021]. Dostupné z: [Manufacturing Milling \(siemens.com\)](https://www.siemens.com/press/en/press-releases/2020/04/manufacturing-milling)
- [12] CMM Inspection Programming [online]. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., ©2020. [vid. 6. 12. 2020]. Dostupné z: [CMM Inspection Programming \(siemens.com\)](https://www.siemens.com/press/en/press-releases/2020/12/cmm-inspection-programming)
- [13] HEIDENHAIN s.r.o. [online]. *TNC 640 Příručka pro uživatele Programování cyklů*. © 2019. [vid. 3. 11. 2020]. Dostupné z: [TNC 640 | Programování cyklů | NC-software 34059x-10 \(heidenhain.de\)](https://www.heidenhain.de/nc-software/34059x-10)
- [14] Novák, Martin. *Využití obrobkové sondy pro měření obrobku*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.