



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE MĚŘICÍCH SOND V PROCESU FRÉZOVÁNÍ NA CNC STROJI MCV1210

APPLICATION OF A MEASURING PROBES IN MILLING PROCES ON CNC MACHINE MCV1210

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kryštof Horáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Kryštof Horáček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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:

Aplikace měřicích sond v procesu frézování na CNC stroji MCV1210

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proces třískového obrábění je doprovázen neustálou snahou dosáhnout vyšší výrobní přesnosti. Zavedením měření přímo do průběhu obrábění je možno výslednou výrobní přesnost automaticky ovlivňovat.

Tato práce se zaměřuje především na využití softwarů Productivity+ a SinuTrain pro programování měřicích operací pro obráběcí CNC stroje.

Cíle diplomové práce:

- stručný přehled metod měření používaných na frézovacích CNC strojích,
- návrh testovacího obrobku včetně vytvoření technické dokumentace,
- návrh měření na frézovacím CNC stroji MCV1210,
- NC programování operací měření pro CNC frézovací stroj.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, T. a MAREK, J. Mít sondu nestačí. Olomoucká 1164/85, Brno: Renishaw s.r.o., 2017. 121 s. ISBN: 978-80-87017-20-3.

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

GUPTA, K. (ed.). Advanced manufacturing technologies. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56098-4.

DAVIM, J. P. (ed.). Modern machining technology: a practical guide. 1st pub. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.

TSCHÄTSCH, H. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009. xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

SHAW, M. C. Metal cutting principles. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005. xix, 651 s. ISBN 01-951-4206-3.

QUESADA, R. Computer numerical control: machining and turning centers. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005. 548 s. ISBN 01-304-8867-4.

Technická příručka obrábění: soustružení - frézování - vrtání - vyvrtávání - upínání nástrojů. AB SANDVIK COROMANT. 2005.10. Švédsko: Elanders, 2005.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 17. 10. 2018





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma **Aplikace měřicích sond v procesu frézování na stroji MCV 1210** vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucího diplomové práce, a to s použitím odborných literárních pramenů, jež jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 20. května 2019

Bc. Kryštof Horáček

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád vyjádřil vděk vedoucímu diplomové práce panu Ing. Aleši Polzerovi Ph.D. za vedení, podporu, cenné rady a pomoc při realizaci této diplomové práce. Dále bych velice rád poděkoval panu Antonínu Dubenskému z firmy Renishaw s.r.o. za vřelou podporu a pomoc.

Největší poděkování ovšem patří všem mým nejbližším, hlavně pak celé mé rodině za bezprecedentní a bezmeznou podporu v průběhu celého mého studia.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na aplikaci měřicích sond do procesu třískového obrábění. Hlavním cíle práce je tedy vytvoření vzorových postupů aplikace měřicích cyklů a funkcí do procesu obrábění na CNC stroji MCV 1210, a to za pomoci vybraných měřicích softwarů. V první části práce jsou nastíněny dostupné metody strojního měření, s velkým důrazem na popis principů měření, konstrukci a způsob přenosu měřicího signálu obrobkových a nástrojových měřicích sond. Druhá část práce se zaměřuje již na samotnou aplikaci měřicích sond do procesu obrábění navrženého testovacího obrobku za využití měřicích softwarů Productivity+™ a Sinumerik ShopMill. Součástí práce je i ekonomické vyhodnocení návratnosti investice do zmiňovaného měřicího vybavení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měřicí sonda, obrobková sonda, nástrojová sonda, měřicí software, metody CNC měření, dotyková sonda, bezdotyková sonda, měřicí cyklus, měřicí funkce.

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the application of measuring probes in the machining process. The main goal of the thesis is to create sample procedures for measuring cycles and functions in a CNC machining process using MCV 1210 and selected measuring software. In the first part of the thesis available methods of machine measurement are outlined with a great emphasis on the description of measurement principles, construction, and measurement signal transmission methods between tool probes and the workpiece. The second part of the thesis deals with the application of measuring probes in the machining of the designed test piece using the Productivity+™ and Sinumerik ShopMill softwares. The work also includes an economic evaluation of the profit of an investment in the mentioned measuring equipment.

KEYWORDS

Measuring probe, workpiece probe, tool probe, measuring software, methods of CNC measurement, touch trigger probe, non-contact probe, measuring cycle, measuring function.

HORÁČEK, Kryštof. *Aplikace měřicích sond v procesu frézování na CNC stroji MCV1210*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116518>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.

OBSAH

Úvod	13
1 Metody měření používané na frézovacích CNC strojích	14
1.1 Měřicí sondy vhodné pro třískové obrábění	15
1.2.1 Dotykové obrobkové sondy	15
1.2.1.1 Konstrukce dotykových obrobkových sond	16
1.2.1.2 Princip měření dotykových obrobkových sond	16
1.2.1.3 Mechanismy dotykových obrobkových sond	17
1.2.1.4 Přenos signálu dotykových obrobkových sond.....	20
1.2.2 Dotykové nástrojové sondy	22
1.2.2.1 Konstrukce dotykových nástrojových sond.....	22
1.2.2.2 Princip měření dotykových nástrojových sond	23
1.2.2.3 Mechanismy dotykových nástrojových sond	23
1.2.2.4 Přenos signálu dotykových nástrojových sond.....	24
1.2.3 Bezdotykové nástrojové sondy	24
1.2.3.1 Konstrukce bezdotykových nástrojových sond.....	25
1.2.3.2 Princip měření bezdotykových nástrojových sond.....	26
1.2 Příklady měřicích sond	26
1.3.1 Porovnání dotykových obrobkových sond	27
1.3.2 Porovnání dotykových nástrojových sond.....	28
1.3.3 Porovnání bezdotykových nástrojových sond	30
1.3 Dílenská měřidla vhodná pro třískové obrábění	32
1.3.1 Absolutní dílenská měřidla.....	32
1.3.1.1 Měřidla na posuvném principu	33
1.3.1.2 Měřidla na principu mikrometrického šroubu.....	33
1.3.2 Komparační dílenská měřidla	34
1.3.2.1 Číselníkové a digitální úchylkoměry	34
1.3.2.2 Měřidla s kombinovaným principem měření	34
1.3.3 Toleranční dílenská měřidla.....	35
1.3.3.1 Kalibry	35
1.3.3.2 Koncové měrky	35
1.4 Moderní trendy v měření	36
1.4.1 Automatické kontrolní/měřicí systémy	36
1.4.2 Měřicí pětiosé systémy	37
1.4.3 Jednostranné laserové systémy	39
2 Návrh testovacího obrobku a technické dokumentace.....	41
2.1 Design testovacího obrobku	41

2.1.1	Aplikované tvarové prvky	42
2.1.2	Materiál testovacího obrobku	43
2.1.2	Technická dokumentace obrobku	44
3	Měření na frézovacím cnc stroji MCV 1210.....	45
3.1	Technické specifikace MCV 1210.....	45
3.2	Vybraný NC měřicí software	47
3.2.1	Měřicí software Productivity+™	47
3.2.1.1	Uživatelské rozhraní	48
3.2.1.2	Měřicí funkce	49
3.2.2	Měření pomocí Sinumerik 840D pl.....	52
3.2.3	Měřicí software Form Control V4.....	52
3.2.4	Měřicí software PowerInspect	53
3.2.5	Měřicí software 3D Form Inspect	53
4	NC programování operací měření pro CNC frézovací stroj.....	55
4.1	Programování měřicích operací v prostředí Productivity+™	55
4.1.1	Postup programování v prostředí Productivity+™	55
4.1.1.1	Import 3D modelu	55
4.1.1.2	Vytváření a definování parametrů měřicí sondy.....	56
4.1.1.3	Vytváření měřicích/kontrolních cyklů	57
4.1.1.4	Vytváření výstupních měřicích protokolů	59
4.1.1.5	Postprocessing	59
4.1.2	Aplikace měřicích operací na testovací obrobek v prostředí Productivity+™	60
4.1.2.1	Měřicí operace před zahájením obráběcího procesu.....	60
4.1.2.2	Měřicí operace během obráběcího procesu	62
4.1.2.3	Měřicí operace po ukončení obráběcího procesu	63
4.2	Programování měřicích operací v prostředí Sinumerik ShopMill	65
4.2.1	Postup programování v prostředí Sinumerik ShopMill.....	65
4.2.1.1	Tvorba 3D modelu	65
4.2.1.2	Vytváření obrazu měřicí sondy	66
4.2.1.3	Definice výstupního protokolu.....	66
4.2.1.4	Kalibrace měřicí sondy	67
4.2.1.5	Aplikace měřicích cyklů a funkcí	68
4.2.2	Aplikace měřicích operací na testovací obrobek v prostředí Sinumerik ShopMill	68
4.2.2.1	Měřicí operace před zahájením obráběcího procesu.....	69
4.2.2.1	Měřicí operace během obráběcího procesu	70
4.2.2.3	Měřicí operace po ukončení obráběcího procesu.....	72

4.3 Porovnání možností NC programování	74
4.4 Ekonomické vyhodnocení zavedení NC měřicích operací	75
4.4.1 Problematika upnutí obrobku	75
4.4.2 Porovnání způsobů upínání obrobku	76
4.4.2.1 Metodika měření ustavení polotovaru obrobku	76
4.4.2.2 Výpočet návratnosti investice	79
Použitá literatura	83
Použité zkratky a symboly	87
Seznam příloh.....	89

ÚVOD

Během posledních let dochází v průmyslových odvětvích k další takzvané průmyslové revoluci. Nejedná se ovšem o revoluci vykoupenu potem dělníků a zahalenou v oblaku páry, jak tomu bylo před mnoha desítkami let. Tato revoluce nesoucí název Průmysl 4.0 se zaměřuje na zavádění informačních, kyberneticko-fyzikálních systémů a systému umělé inteligence do výrobních procesů. Díky těmto systémům dochází k celoplošné integraci výrobních strojů do plně automatizovaných a vzájemně propojených výrobních celků, které se dokáží sami optimalizovat a konfigurovat svoje parametry v závislosti na potřebách výroby. Důležitým faktorem Průmyslu 4.0 je pak sběr velkého množství dat, kdy je k tomuto sběru využíváno mnoho měřicích senzorů a měřicích zařízení. Zpracování a analýza těchto dat slouží k postupnému učení systémů umělé inteligence. Ty jsou následně schopny rozhodovat tak, aby byly požadované výrobní úkony splněny s co možná nejvyšší efektivitou [1].

Právě měřicí obrobkové a nástrojové sondy představují jedny z měřicích zařízení, jejichž možnosti použití se ztotožňují s myšlenkami Průmyslu 4.0. Jejich univerzálnost, při kombinaci s vhodným měřicím softwarem, poskytuje výborné předpoklady pro uplatnění v průmyslové výrobě nové generace.

Diplomová práce se zabývá aplikací těchto měřicích sond pro procesů třískového obrábění, přesněji pak do procesů frézování na obráběcím CNC centru MCV 1210. Dále práce obsahuje teoretickou rešeršní část, která se zaměřuje na vlastnosti a možnosti aplikace vybraných obrobkových a nástrojových sond. Hlavním cílem diplomové práce je vytvoření vzorových postupů a doporučení pro aplikaci měřicích sond do obráběcích procesů, a to za využití vybraných měřicích softwarů. Vzorové měřicí funkce a cykly jsou aplikovány na navržený testovací obrobek, který je rovněž součástí diplomové práce.

1 METODY MĚŘENÍ POUŽÍVANÉ NA FRÉZOVACÍCH CNC STROJÍCH

Potřeba kontroly rozměrů se prolíná všemi stádii výroby jakéhokoliv výrobku. U technologií třískového obrábění je tato potřeba ještě markantnější. Samotný proces měření, a s tím spojená potřeba kalibrace používaných měřidel, je nezastupitelná činnost, která se dívá na obráběcí proces z hlediska jakosti. Způsoby měření daných rozměrů součástí lze poté rozdělit do tří základních metod [2]:

- absolutní měření – způsob, kdy jsou zjišťovány přímo hodnoty rozměrů součástí,
- komparační (porovnávací) měření – způsob, při kterém dochází ke zjišťování odchylky od předem stanoveného rozměru,
- toleranční měření – způsob, jež hodnotí, zda byly dodrženy předpisy, tedy zda nebyly překročeny mezní rozměry.

Z historického hlediska je proces měření neodmyslitelný prvek spadající do procesu strojního třískového obrábění. Nejvíce frekventovanou operací měření v procesu je měření délkových rozměrů. Tento druh měření představuje až 70 % všech provedených měřicích operací. V závislosti na technologickém vývoji procesů obrábění vyvstala silná poptávka po nové, modernější a přesnější měřicí technice [3].

Rozdělení na tři základní metody měření ovšem není konečně definující. V praxi je možné narazit na měřicí zařízení, která je možno používat pro více těchto metod. Jasným důkazem tohoto faktu jsou například měřicí sondy, přesněji dotykové obrobkové sondy.

Dotykové obrobkové sondy jsou velice univerzální měřicí zařízení, a to hlavně díky svým vlastnostem a unikátním mechanismům na jejichž principu fungují. Tento druh sond je možné uplatnit jak při absolutním měření nebo i při měření komparačním. V případě absolutního (přímého) zjišťování rozměrových informací se jedná o činnosti, kdy jsou kupříkladu určovány počáteční rozměry polotovarů obrobků, zaznamenávány velikosti a orientace úhlů na obrobku nebo měřeny tloušťky stěn již výrobků hotových. Zároveň však tyto sondy velice kvalitně slouží k přesnému určování shody daných geometrických rozměrů a tvaru s 3D modely součástí nebo se vzorovými obrobky. Tento rychlý komparační způsob zjišťování odchylek vede k zajišťování vysoké přesnosti procesu třískového obrábění.

Na druhou stranu mnoho takzvaných dílenských měřidel nebo měřicích zařízení je určeno k použití jen s jednou touto metodou. Pověštinou se jedná o měřidla ruční, využívající poměrně jednoduchých mechanických principů. Avšak i mezi ručními dílenskými měřicími zařízeními lze narazit na výjimku potvrzující pravidlo. Takovou výjimkou je passametr. Ten opět kombinuje absolutní metodu měření pomocí mikrometrického šroubu s komparační metodou měření pákovým nebo zubovým úchylkovým mechanismem. Díky tomu, že oba dotyky tohoto zařízení jsou mechanicky pohyblivé, je passametr využíván pro zjišťování odchylek od předem stanoveného jmenovitého rozměru. V krajním případě potom může nahrazovat mikrometr pro absolutní měření geometrických rozměrů. Ostatně všechna tato měřidla či měřicí dílenská zařízení jsou rozebrána níže.

1.1 Měřicí sondy vhodné pro třískové obrábění

V moderním třískovém CNC obrábění, v tomto případě CNC frézování, hraje nezanedbatelnou roli čas. Právě snižování výrobních časů, a tím zvyšování využití výrobních kapacit těchto strojů, vede k maximalizaci produktivity výroby. Dotykové měřicí sondy nemalou měrou přispívají k onomu snižování výrobních časů, tím pádem i snižování výrobních nákladů.

Měřicí sondy je možné rozdělit na **sondy obrobkové** a **nástrojové**. Obrobkové sondy jsou nemalým pomocníkem při ustavování polotovaru obrobku na pracovním stole frézovacího CNC stroje, dále pomáhají při průběžném zjišťování rozměrů obrobků při frézování nebo stanovení nulového bodu obrábění. Naopak nástrojové sondy se zaměřují na samotný obráběcí nástroj. Zde mohou kontrolovat jeho rozměry, upravovat tolerance nástroje nebo rozpoznávat opotřebený či porušený nástroj.

Zmíněnými funkcemi měřicí sondy výrazně zrychlují proces výroby součástí. Tím šetří nejenom čas potřebný pro proces měření, ale také umožňují zvyšování automatizace celého výrobního procesu.

1.2.1 Dotykové obrobkové sondy

V procesu CNC frézování vzniká potřeba přesného a hlavně rychlého měření elementů obráběných součástí. V současných moderních provozech jsou pro tuto činnost nejčastěji využívány dotykové obrobkové sondy. Tyto sondy v procesu obrábění fungují automatizovaně, vždy však podle naprogramovaného NC protokolu.

Dotykové obrobkové sondy (Obr. 1.1) jsou používány jako nástroje, které umožňují zahájení a průběh výroby bez ručního zásahu obsluhy stroje. Pomocí vlastního programovatelného ovládacího softwaru mohou například nastavovat počátek souřadného systému obrábění tzv. nulový bod obrábění, nebo za pomoci měřicích cyklů proměřovat již zhotovené prvky (části) obrobků. Naměřená data jsou dále ukládána a zpracovávána v řídicím počítači stroje, kde slouží k porovnání s 3D modelem dané součásti [4].



Obr. 1.1: Obrobková dotyková sonda Renishaw OMP 400 [5].

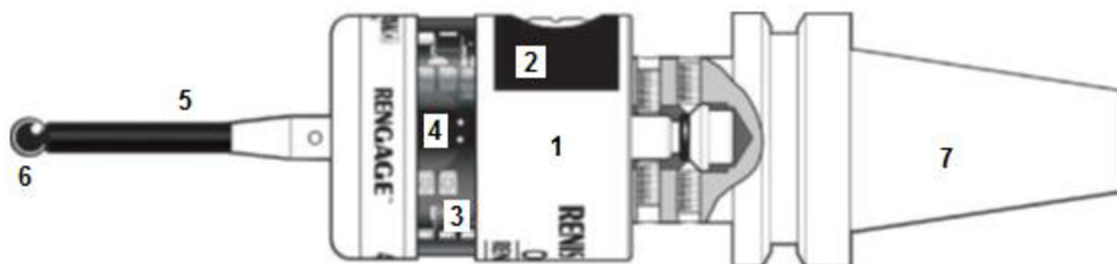
1.2.1.1 Konstrukce dotykových obrobkových sond

Konstrukce dotykových obrobkových sond se napříč výrobci příliš nemění. Každý typ sondy je složen ze tří základních částí. Jedná se o upínací prvek, tělo a měřicí dotyk sondy (Obr 1.2).

Upínací prvky jsou u sond prezentovány upínacími kužely. Sonden samotné jsou kompatibilní se všemi průmyslově využívanými upínacími kuželovými systémy [6]. Upínací kužely zajišťují správné, osově přesné, upnutí sondy do stroje a slouží také k vložení sondy do zásobníku nástrojů obráběcího stroje.

Tělo neboli modul sondy lze považovat za její srdce. Vnitřní prostor válcovitého těla vyplňuje měřicí mechanismus, kazeta na napájecí baterie a elektronické zařízení (vysílač) sloužící k přenosu signálu. Z jeho povrchu dále vystupuje notifikační LED dioda, indikující režimy sondy, a také stav napájecích baterií. Je nutné dbát na opatrné zacházení s touto částí, jelikož se jedná o velice náchylné zařízení na mechanické poškození [6].

Poslední součástí sondy je vyměnitelný měřicí dotek. Ten lze rozdělit na dvě části: dřív a hlavu doteku. Pro obě zmíněné části je velice důležitá rozměrová stálost a mechanická tuhost. Právě z tohoto důvodu jsou dřívky sond vyráběny z příhodných materiálů (titan, nerezové oceli, keramika, uhlíková vlákna). Na druhou stranu hlavy doteků jsou nejčastěji vyhotoveny z průmyslových rubínů, dále pak z nitridu křemíku nebo oxidu zirkoničitého. Tyto materiály jsou tvarovány do stanovených tvarů (kuličky, válečky, disky, skořepinové polokoule) [4,5].



Obr. 1.2: Popis konstrukce dotykové obrobkové sondy (1 - Modul, 2 - Kazeta na baterii, 3 - LED dioda, 4 - Průhledný kryt, 5 - Dřív dotyku, 6 - Měřicí dotyk, 7 - Upínací kužel) [6].

1.2.1.2 Princip měření dotykových obrobkových sond

Dotykové obrobkové sondy lze díky svému principu měření označit jako dotykové spínací sondy. Toto označení vychází ze skutečnosti, že měřicí mechanismus se spíná při kontaktu s měřeným objektem. Sepnutím se rozumí vygenerování spínacího signálu v mechanismu sondy. Ten je následně odeslán do řídicího počítače stroje. Řídicí počítač stroje v daném okamžiku zaznamená polohu sondy v jednotlivých osách. Zaznamenané hodnoty jsou uloženy do paměti stroje a proces měření pokračuje k dalšímu měřenému bodu.

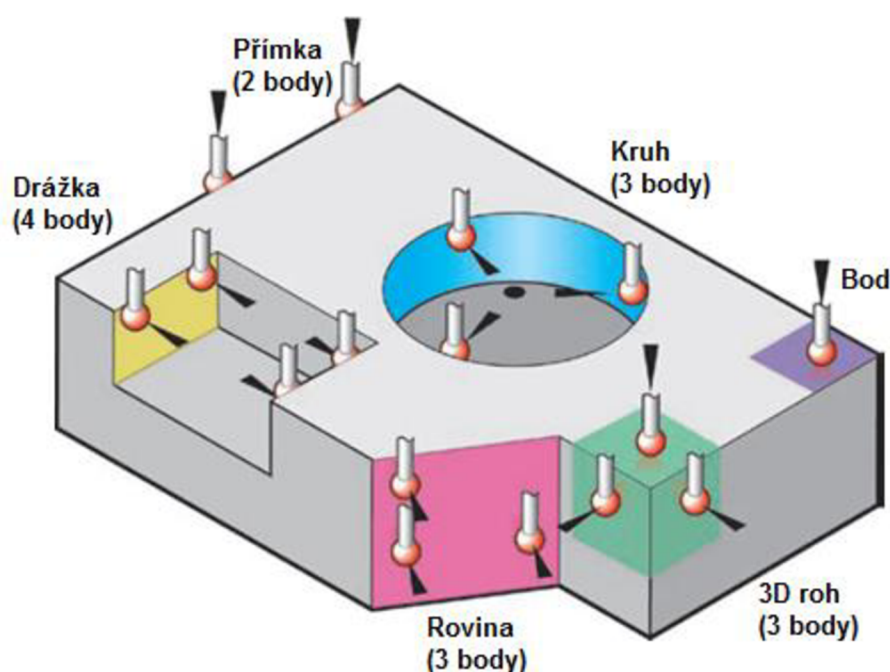
Měření je vyhodnocováno z množiny naměřených bodů, jež jsou porovnávány s teoretickými ekvivalenty měřených tvarů. Velikost množiny naměřených bodů odpovídá složitosti daného prvku, tedy jeho počtu stupňů volnosti (Obr. 1.3) [6].

Konečným porovnáním změřených (skutečných) a předpokládaných (teoretických) rozměrů jsou zjištěny velikosti rozměrových odchylek. Tento komparační způsob měření vytváří podmínky pro aktivní zpětnou vazbu. Stroje vybavené dotykovými

obrobkovými sondami poskytují značné výrobní výhody. Pomocí předem naprogramovaných softwarových cyklů a podmínek mohou využívat následující operace:

- Natáčení a přesouvání souřadného systému obrábění (nulového bodu obrábění), dle aktuální polohy obrobku.
- Automatické rozložení přídavek pro obráběné plochy odlitků a výkovků.
- Automatizovaná mezioperační kontrola velikosti a polohy obrobených rozměrů.
- Možnost automatické změny korekcí nástrojů a korekcí rozměrů v závislosti na vnějších podmínkách (např. teplotní dilatace nástroje nebo polotovaru obrobku).
- Kontrola úplnosti a rozměrové správnosti dokončené operace obrábění.

Dochází tak k prohlubování automatizace procesu obrábění, což vede k eliminaci chybovosti obsluhy stroje a zvyšování rentability výroby [4].



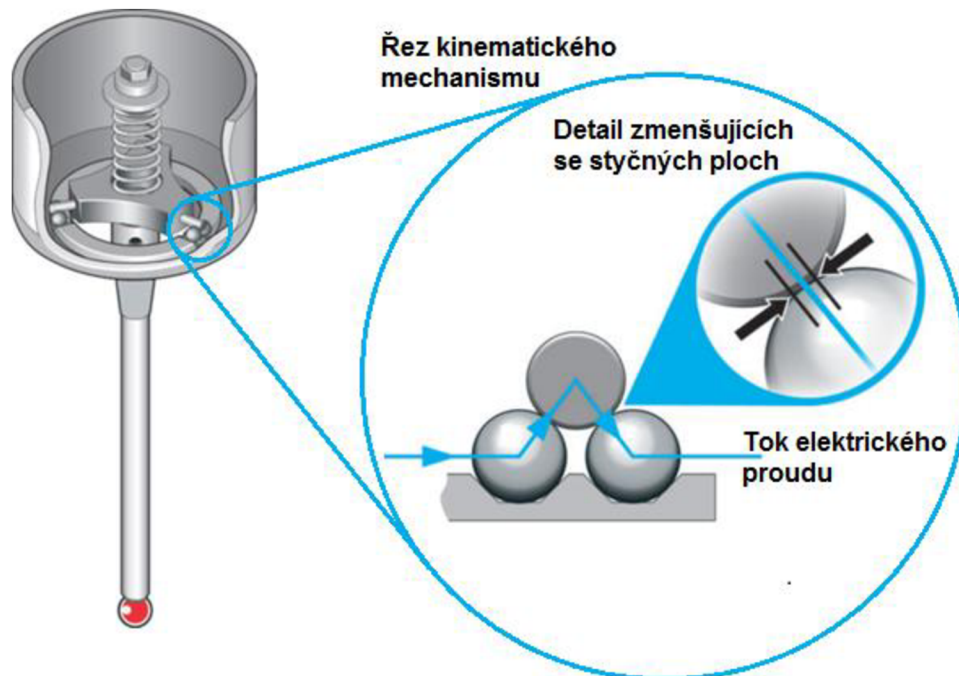
Obr. 1.3: Vyobrazení principu měření jednotlivých tvarových prvků [6].

1.2.1.3 Mechanismy dotykových obrobkových sond

Měřicí signál dotykových obrobkových sond je generován jejich vnitřním spínacím mechanismem. Je možné narazit na čtyři typy těchto mechanismů. Nejrozšířenější jsou sondy fungující na **kinematickém** a **tenzometrickém principu**. Paletu variant doplňují ještě spínače pracující na **piezoelektrickém** nebo **optickém principu** [7].

Mechanismus **kinematické dotykové sondy** je založen na třech rovnoměrně rozmístěných kovových válečcích uložených na šesti kuličkách z karbidu wolframu, toto uložení tvoří uzavřený elektrický obvod (Obr. 1.4). Tento mechanismus je stabilizován pomocí přítlačné pružiny, která zároveň umožňuje jeho vychýlení v okamžiku kolize doteku sondy s obrobkem. Při oddálení sondy od obrobku se mechanismus vrací zpět do své výchozí polohy s tolerancí 1 μm .

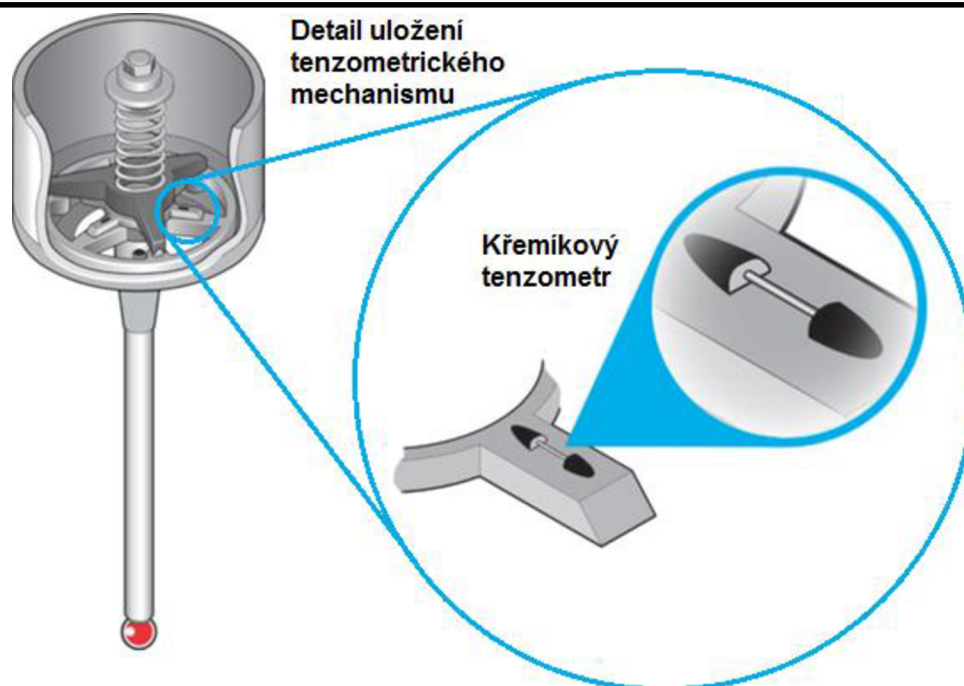
Kontakt doteku sondy a obrobku je doprovázen vznikem tlakových sil, které v mechanismu způsobují změnu velikosti styčných ploch uložení sondy. Touto změnou velikosti styčných ploch se zvyšuje elektrický odpor těchto elementů mechanismu. Při dosažení stanovené prahové hodnoty elektrického odporu dojde k tzv. rozeprnutí kontaktu. Sonda vyhodnotí toto rozeprnutí a odesílá spínací (měřicí) signál do řídicího počítače stroje [6].



Obr. 1.4: Detail kinematického mechanismu [6].

Tenzometrické dotykové sondy jsou vybaveny křemíkovými tenzometry, ty jsou upevněny na speciálních žebrech oddělených od kinematického mechanismu sondy (Obr. 1.5). Mechanismus je i u této varianty stabilizován pomocí přitlačné pružiny. Uspořádání měřicích tenzometrů je navrženo tak, aby dokázalo snímat síly působící na dotek sondy z jakéhokoliv směru.

Nevyvratitelnou výhodou tenzometrických sond je fakt, že spínací síla je výrazně nižší než u sond kinematického typu. Po dosažení prahové hodnoty deformace tenzometru je v sondě generován spínací (měřicí) signál, jež je přenesen do řídicího počítače obráběcího stroje [5].

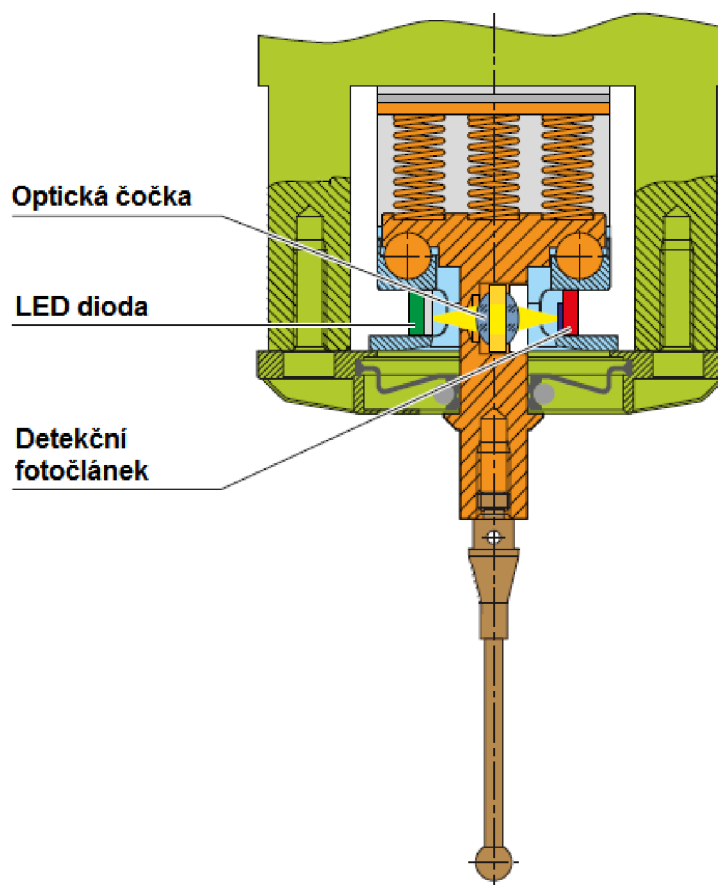


Obr. 1.5: Detail tenzometrického mechanismu [6].

Princip **piezoelektrických dotkových sond** je založen na deformaci piezoelektrického krystalu. Za hlavní části tohoto mechanismu lze označit speciálně vybroušený piezoelektrický krystal a přítlačnou pružinu. Přítlačná pružina, stejně jako u ostatních mechanismů, celý mechanismus stabilizuje, a zároveň také vyvozuje počáteční předpětí krystalu. Spínací signál je vyvozován pomocí piezoelektrického jevu. Ten spočívá v přiblížování opačných stran krystalu s rozdílným elektrickým potenciálem. Deformací krystalu je generováno elektrické napětí, které je využíváno jako spínací signál.

Předností tohoto spínacího mechanismu je vysoká opakovatelnost měření a citlivost na dotyk, kterou je možné kalibrovat na spínací sílu jen 0,2 N. Nevýhodou je citlivost na nízkofrekvenční zvuky, které může vyvolávat spouštění motoru nebo vibrace obráběcího stroje [7].

Posledním dostupným mechanismem jsou **dotkové sondy na optickém principu**. Sondy tohoto principu pracují se světelným paprskem, přičemž spínací signál je generován při změně polohy jeho dopadu na snímač. Existují dva typy optického spínacího mechanismu. První z nich vysílá pomocí LED diody paprsek světla skrze skleněnou čočku pevně spojenou s dotkovým mechanismem sondy. Při dotyku sondy s obrobkem je paprsek vychýlen ze stálé polohy na fotobuňce a sonda vysílá spínací signál (Obr. 1.6) [7]. Druhá varianta funguje obdobně, ovšem skleněná čočka je zde nahrazena odrazovým zrcátkem, které je opět napevno spojeno s dotkovým mechanismem sondy. Laserový paprsek je od zrcátka odražen do snímací fotobuňky. Je-li při dotyku sondy s obrobkem paprsek vychýlen ze své stálé polohy na snímači, dochází k vygenerování spínacího signálu [9].



Obr. 1.6: Detail optického mechanismu [10].

Obrovskou výhodou tohoto principu je jeho, v porovnání s ostatními principy, poměrně nízká pořizovací cena. A to při zachování obdobných měřicích výsledků. Nevýhodou představuje vysoká náchylnost na mechanické poškození optických součástí dané sondy [7].

1.2.1.4 Přenos signálu dotykových obrobkových sond

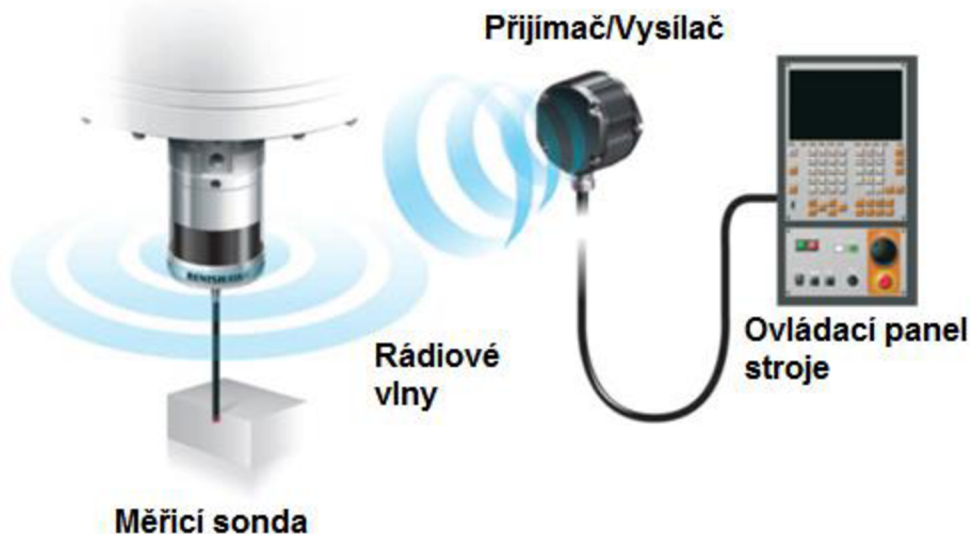
Nedílnou součástí měřicího procesu je i přenos spínacích signálů ze samotné sondy do řídicího počítače obráběcího stroje. Tento přenos lze uskutečňovat za pomoci více technologií, ať už kabelové, rádiové či optické. Je nutné si uvědomit, že obrobkové sondy, které se umísťují do vřetene stroje, nelze s řídicím počítačem spojovat pomocí kabelové technologie. Zde je zapotřebí tedy použít bezdrátové metody přenosu signálu. Technologie přenosu spínacího signálu pomocí kabelu nachází své uplatnění zejména u nástrojových sond.

K přenosu měřicích signálů za použití **optických přenosových systémů** (Obr. 1.7) je využívána infračervená část světelného spektra. Tento typ přenosu je vysoce spolehlivý, zdravotně nezávadný a nenáchylný na vnější rušení. Nevýhodou tohoto systému je ovšem nutnost neustálého vizuálního kontaktu mezi sondou a přijímačem signálu. Maximální dosah optického přenosového systému činí 6 m, proto se uplatňují spíše v uzavřených kompaktních obráběcích strojích [6].



Obr. 1.7: Schéma optického přenosového systému [6].

Další možností přenosu měřicího signálu je **system rádiového přenosu signálu** (Obr. 1.8), kde komunikuje sonda s přijímačem pomocí rádiových vln o frekvenci v rozmezí 2,4 až 2,5 GHz. Výhodou tohoto systému je jeho schopnost se automaticky přeladit na jinou blízkou rádiovou frekvenci v případě vnějšího rušení. Dále díky rádiovému přenosu signálu odpadá požadavek neustálého vizuálního kontaktu. Užitečná přenosová vzdálenost je pak 15 m, tu je možno využít u obráběcích strojů velkých rozměrů [8].



Obr. 1.8: Schéma rádiového přenosového systému [6].

Poslední variantou přenosu měřicího signálu ze sondy do řídicího počítače stroje je využití **kabelového přenosového systému** (Obr. 1.9). Jedná se o nejméně nákladnou variantu, která je ovšem vhodná pouze pro nástrojové sondy. Obrobkové sondy, které se umísťují do vřetene obráběcího stroje, při použití tohoto přenosového systému ztrácí veškeré své výhody, a to např. volnost pohybu, automatickou vyměnitelnost a v neposlední řadě také vyžadují ruční manipulaci [6,8].



Obr. 1.9: Schéma kabelového přenosového systému [6].

1.2.2 Dotykové nástrojové sondy

Dotykové nástrojové sondy jsou dalším dostupným typem měřicích sond vhodných pro aplikaci v CNC frézování. Jejich hlavním posláním je automatické měření obráběcích nástrojů. Dotykové měření nástrojů je proces, při kterém jsou získávány důležité geometrické informace o obráběcích nástrojích. Nejčastěji se dotykové měření zaměřuje na informace jako jsou délka nebo průměr nástroje. Pomocí těchto dotykových sond je možné detekovat i poškozený obráběcí nástroj.

I když dotykové nástrojové sondy disponují oproti bezdotykovým sondám menší oblastí využitelnosti, jsou i tak nenahraditelným pomocníkem v procesech CNC obrábění. Pomocí zjištěných geometrických rozměrů nástrojů jsou schopny velice pružně a automaticky korigovat či úplně měnit systémové nastavení těchto nástrojů. V praxi jsou rovněž využívány pro zakládání nových nástrojů do systému nástrojových databází [6].

Zapojení dotykových nástrojových sond do procesů CNC frézování poskytuje možnosti lepšího využití (mnohdy velice nákladného) CNC obráběcích strojů. Automatizovaná práce s obráběcími nástroji a následně s nástrojovými databázemi snižuje vedlejší strojní časy. Tím zvyšuje produktivitu celé výroby. Zároveň zvyšuje přesnost obrábění, což má kladný dopad na množství vyrobených neshodných kusů [10].

1.2.2.1 Konstrukce dotykových nástrojových sond

Z pohledu konstrukce jsou dotykové nástrojové sondy skoro identické jako obrobkové dotykové sondy. Rovněž se skládají z upínacího prvku, těla a měřicího doteku. Vše je ale uloženo vzhůru nohama oproti obrobkovým sondám.

Upínací prvek slouží ke stabilnímu upnutí dotykové nástrojové sondy k pracovnímu stolu obráběcího stroje. Toto upnutí je nejčastěji prováděno pomocí šroubů, které sondu pevně spojí s pracovním stolem. Upínací prvky sond některých výrobců jsou vylepšeny magnetickými přidržovači, ty umožňují operativní přemístování sond po pracovním stole [6,10].

Druhou částí tohoto typu sond je tělo (modul) sondy. Robustní tělo sondy je vybaveno měřicím mechanismem, kazetou pro umístění napájecí baterie

a elektronickým systémem, který se stará o přenos spínacího signálu. Na povrchu sondy se opět nachází notifikační LED dioda, ta indikuje měřicí režimy a stav napájecí baterie sondy. Celé tělo je pak zatěsněno dle standardu IP 68 (Ingress Protection 68), což znamená, že daná sonda je plně odolná vůči vniknutí prachu, vůči poškození nebezpečným dotykem, a také je schopna omezeného ponoření do vody [10,11].

Třetí a poslední funkční částí dotykové obrobkové sondy je měřicí dotyk. Samotný měřicí dotyk se skládá ze spojovacího čepu a diskového doteku. Spojovací čep je přesně definovaná součást, která může mít vyfrézovanou lomovou zónu. Ta chrání sondu před mechanickým poškozením, protože se v případě chybné kolize zlomí. Vyměnitelný dotek má nejčastěji tvar disku nebo talíře, je ovšem možné narazit i na doteky čtvercového tvaru. Materiálem, ze kterého jsou doteky vyráběny, je karbid wolframu, často vybavený keramickým čelem [6,10].

1.2.2.2 Princip měření dotykových nástrojových sond

Princip měření pomocí nástrojových dotykových sond je velice podobný tomu u dotykových obrobkových sond. Paralela se nachází v porovnávání změřených (skutečných) a předpokládaných (teoretických) geometrických rozměrů měřených nástrojů.

Samotný spínací signál je v závislosti na měřicím mechanismu generován při řízeném dotyku nástroje s měřicím dotykem sondy. V okamžiku, kdy spínací mechanismus sondy zaznamená kontakt, je vygenerován spínací signál a odeslán do řídicího počítače stroje. Ten, stejně jako u obrobkových sond, do své paměti ukládá polohu nástroje vůči nástrojové sondě v jednotlivých osách [4].

Při měření na tomto typu sond není zapotřebí brát v potaz směr snímání, poněvadž dotykové nástrojové sondy jsou schopny měřit v osách: $\pm X$, $\pm Y$ a $+Z$. Přičemž potřebná spínací síla se pohybuje v rozmezí 1 až 8 N v závislosti na směru snímání a na měřicím mechanismu [6,10].

1.2.2.3 Mechanismy dotykových nástrojových sond

Dostupné dotykové nástrojové sondy jsou vybaveny dvěma typy měřicích (spínacích) mechanismů. Detailně se jedná o mechanismy na **kinematickém** a **optickém principu**. Tyto principy jsou prověřené z oblasti obrobkových sond, a poskytují pevný základ pro vysoce přesné automatické měření obráběcích nástrojů. Nástrojové dotykové sondy je možné dělit dle orientace jejich mechanismu vzhledem k pracovnímu stolu stroje. Existují tak sondy s kolmým a s vodorovným uložením tohoto mechanismu.

Princip kinematického mechanismu vychází z trojice rovnoměrně rozmístěných kovových válečků, které jsou uloženy na šestici vodivých kuliček z karbidu wolframu. Zmíněné komponenty tak tvoří uzavřený elektrický obvod. O stabilizaci a možnost vychylování dotyku sondy se stará přítlačná pružina. Při kontaktu měřeného obráběcího nástroje s měřicím dotykem sondy nastává změna velikosti styčných ploch komponentů mechanismu. Její zásluhou dochází ke zvyšování elektrického odporu v obvodu. V situaci, kdy dojde k překročení definované prahové hodnoty elektrického odporu, sonda vyhodnotí tuto situaci jako rozepnutý kontakt, a odešle spínací signál do řídicího počítače stroje [6].

Mechanismus na **optickém principu** je využíván hlavně pro svoji jednoduchost a vysokou životnost. Samotný princip optického měřicího mechanismu spočívá v emitalci světelného paprsku LED diodou, a následného sledování místa dopadu tohoto paprsku. Paprsek v mechanismu prochází přes optickou čočku, která je pevně

spojena s měřicím dotykem sondy. Optická čočka prošlý světelný paprsek cílí do jednoho místa na fotobuňce mechanismu. V okamžiku dotyku měřeného nástroje a měřicího dotyku je paprsek vychýlen ze své statické polohy, což je zaznamenáno fotobuňkou. Ta pak odesílá spínací signál do řídicího počítače obráběcího stroje. Celý mechanismus je opět stabilizován pomocí přitlačné pružiny [10].

1.2.2.4 Přenos signálu dotykových nástrojových sond

Dotykové nástrojové sondy oplývají, co se týče přenosu spínacího signálu, nevyvratitelnou výhodou. Jelikož se jedná o zařízení statická umístěná na pracovním stole obráběcího stroje, lze pro přenos spínacích signálů použít všechny dostupné technologie. Detailně se jedná o **optické, radiové a kabelové přenosové systémy**.

Veskrze se jedná o shodné technologie přenosu spínacího signálu jako u dotykových obrobkových sond. **Optické (infračervené) přenosové systémy** se řadí do systému bezdrátových. Tudíž umístění této sondy není omežováno potřebou bezpečného vývodu přenosového kabelu. Jediná omezení vyplývají ze samotné optické technologie. Pro správnou funkčnost sondy je nutné, aby byla v neustálém optickém kontaktu s infračerveným přijímačem signálů a nenacházela se mimo jeho dosah (maximální dosah činí 6 m). Na druhou stranu tyto přijímače lze využívat pro více sond zároveň. Je tedy možné jeden optický systémový přijímač připojit až tři optické sondy různého druhu [6].

Rádiové přenosové systémy poskytují srovnatelné možnosti využití jako ty optické. Jejich výhodou oproti nim je však absence nutnosti neustálého vizuálního kontaktu. Díky rádiovým vlnám, které mají dosah až 15 m, jsou tyto sondy využívány pro nadrozměrné obráběcí stroje. I u tohoto systému je možné použití více sond na jeden rádiový systémový přijímač. Lze tedy zároveň měřit až pomocí čtyř nástrojových nebo obrobkových sond zároveň [6].

Nejjednodušším a nejméně nákladným je přenos spínacího signálu pomocí **kabelového přenosového systému**. Ten poskytuje jednoduchou a robustní možnost přenosu spínacího signálu do řídicího počítače obráběcího CNC stroje. Jeho použitelnost je ovšem omezená nutností statického umístění v pracovním prostoru stroje. Zároveň také podporuje připojení vždy pouze jedné sondy [6].

1.2.3 Bezdotykové nástrojové sondy

Bezdotykové nástrojové sondy jsou typem sond, které ke zjišťování geometrických a stavových informací o nástroji využívají laserovou technologii. Měření pomocí této technologie lze považovat za vysoce flexibilní a zároveň velice přesné. Laserové nástrojové sondy oplývají, v porovnání s dotykovými nástrojovými sondami, větší paletou možností využití, a s tím souvisejícím větším množstvím užitečných funkcí. Na druhou stranu se jedná o zařízení náročnější na údržbu a celkově náchylnější k vnějším vlivům. Výhody tohoto typu sond však značně převyšují zmíněná negativa [8].

Mezi výhody se jednoznačně řadí schopnost sondy měřit frézovací nástroje jak za klidu, tak při jmenovitých otáčkách. Právě tato možnost poskytuje informace nejen o geometrických rozměrech daného nástroje, ale také detekuje případné vady vřetena stroje nebo vady v upnutí nástroje. Pomocí laserové technologie jsou sondy dále využitelné pro vysokorychlostní kontrolu profilu břitu nástroje, jejich opotřebení, kompletnost a celistvost. Již jako standardní je zde funkce automatické kontroly a korekce tolerancí rozměrů a systémového nastavení nástroje v řídicím počítači CNC stroje [8,10].

V procesu CNC obrábění zaručují bezdotykové (laserové) sondy značnou spolehlivost při kontrole nástrojů, dále pak vysokou přesnost jejich měření a v neposlední řadě důvěryhodnost sledování jejich opotřebení. Těmito kroky přispívají k neustálému zvyšování přesnosti výroby a produktivity procesu obrábění. Zároveň slouží jako nástroj pro prohlubování automatizace procesu obrábění, čímž tento proces činí stále více bezobslužný, a tím ho posouvá blíže ke standardům Průmyslu 4.0 [10].

1.2.3.1 Konstrukce bezdotykových nástrojových sond

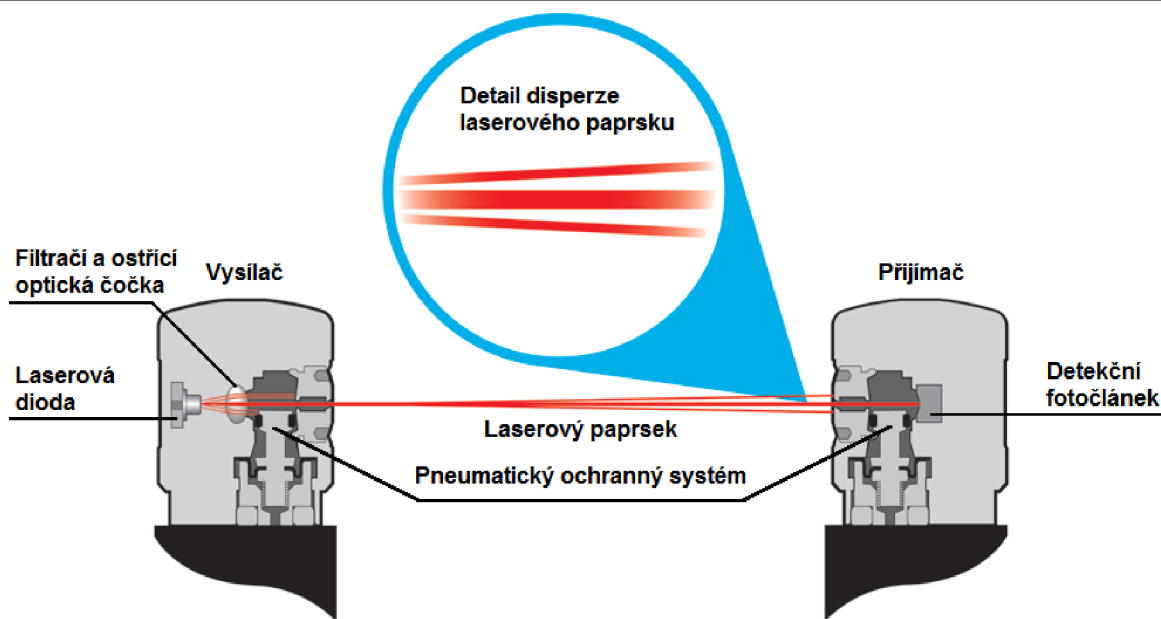
Co se konstrukce týče, bezdotykové (laserové) sondy se primárně skládají z laserového **vysílače** a **snímače** (Obr. 1.10). Ty jsou v přesně definovaném rozmezí pevně spojeny s vodorovnou základnou sondy, a připevněny k pracovnímu stolu obráběcího stroje.

Vysílač ve svých útrokách obsahuje laserovou diodu, která vysílá viditelný červený laserový paprsek o vlnové délce 630 až 700 nm. Používaný typ laseru se řadí dle bezpečnosti laserů do Třídy II, tedy lasery s výkonem menším než 1 mW. Před těmito lasery se dokáže lidské oko chránit svými přirozenými reflexy [10,12].

Emitovaný paprsek je usměrňován pomocí filtrační optiky a zaostřován pomocí ostřicí čočky. Takto upravený paprsek je štěrbinou ve vysílači sondy odeslán směrem ke snímači. Paprsek vstupuje do **snímače** taktéž malou štěrbinou. Zde kvůli disperzi laseru prochází speciálním optickým filtrem, který zamezuje zkreslení měření. Fotodetektor instalovaný ve snímači zaznamenává dopadající paprsek [6,10].

Vysílač i snímač bezdotykové nástrojové sondy je vybaven mechanismem, který uzavírá průchozí štěrbinu v okamžiku, kdy není sonda v provozu. Činí tak, aby nedošlo ke vniknutí provozních kapalin do útrobu sondy. Zavírací mechanismus funguje na principu malých pístů, kterými je pohybováno filtrovaným tlakovým vzduchem. Tlakový vzduch je dále využíván také jako ochranný prvek. Během měření prochází, společně s laserovým paprskem, štěrbinami ven ze sondy a zabraňuje vniknutí procesních kapalin a třísek do snímače nebo vysílače sondy [6].

Jediným podstatným omezením vyplývajícím z konstrukce bezdotykových (laserových) sond je dodávání těchto sond pouze s kabelovým přenosovým systémem. Tento fakt je zapříčiněn potřebou neustálého připojení na přívod filtrovaného tlakového vzduchu. Kvůli tomuto omezení musí být laserové sondy pevně (a bez možnosti operativního přesunu) umístěny na pracovním stole obráběcího stroje. A to tak, aby byly dobře dostupné a obrábění nemohlo poškodit systémovou kabeláž sondy.



Obr. 1.10: Schéma bezdotykové (laserové) nástrojové sondy [6].

1.2.3.2 Princip měření bezdotykových nástrojových sond

Měření pomocí bezdotykových (laserových) nástrojových sond je realizováno přerušováním laserového paprsku, který prochází mezi vysílačem a přijímačem bezdotykové sondy. Aby bylo dosaženo korektního měření, je nutné dodržet podmínku kolmého pohybu nástroje směrem k laserovému paprsku. Přesná geometrie nástroje je určena díky průchodu sondou z vícero směrů.

Spínací signál laserových sond je generován v závislosti na částečném nebo úplném protnutí měřicího laserového paprsku. V okamžiku, kdy nástroj protne laserový paprsek, je na snímacím fotodetektoru zaznamenán pokles intenzity dopadajícího světla. Právě tento zaznamenaný pokles je impulsem pro vygenerování spínacího signálu. Laserové sondy lze nastavit i tak, aby byl spínací signál generován opačným způsobem. Tedy tak, že laserový paprsek je primárně přerušen a spínací signál je vygenerován v okamžiku jeho opětovného dopadu na fotodetektor. Tímto způsobem získané informace o geometrických rozměrech nástroje jsou vkládány nebo porovnávány s nástrojovou databází v řídicím počítači obráběcího stroje. Při zjištění rozměrových nesrovnalostí je geometrie nástroje upravena nebo je nástroj označen jako nevyhovující a z databáze je vyřazen [6,8].

Existuje vícero možných snímacích strategií, ty jsou ovšem všechny předem programovány pomocí softwarových cyklů a logických podmínek. Jak již bylo zmíněno, měření lze provádět jak za klidu, tak za rotace nástroje definovanými otáčkami. Hodnoty otáček se pohybují v rozmezí 600 až 4000 min⁻¹ v závislosti na průměru nástroje. Důležitý je také směr pohybu vůči měřicímu laseru. Zanořovací (tlačné) a vynořovací (tažné) měření je využíváno v závislosti na typu a velikosti měřeného nástroje. Tažný směr měření je využíván spíše pro masivní nástroje, zatímco tlačný směr se uplatňuje u nástrojů subtilnějších [10].

1.2 Příklady měřicích sond

Na trhu s měřicími zařízeními vhodnými pro CNC frézování se pohybuje poměrně velké množství výrobců. Pověstinou se jedná o velké nadnárodní firmy specializující

se na celou oblast metrologie. Zde byli vybráni výrobci, jejichž portfolio výrobku obsahuje popisované obrobkové a nástrojové sondy. Vybrané příklady měřicích sond jsou pomocí technických parametrů porovnávány se sondami dostupnými v laboratořích Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

Jelikož Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně dlouhodobě spolupracuje s firmou Renishaw s.r.o. jsou výrobní laboratoře vybaveny právě sondami této firmy. Samotná firma Renishaw s.r.o. představuje etalon kvality v oblasti strojního CNC měření. Výrobou měřicích sond se zabývá již více než 45 let. Za tuto dobu si díky kvalitním a inovativním výrobkům tato firma vydobyla věhlas a patřičné renomé napříč celým strojírenským odvětvím.

1.3.1 Porovnání dotykových obrobkových sond

Pro porovnávání dotykových obrobkových sond byly zvoleny sondy (Obr. 1.11), které jsou svými technickými parametry velice podobné využívané sondě značky Renishaw s.r.o. Jako hlavní podobnostní parametry byly brány v potaz rozměry sondy a způsob přenosu měřicího signálu. Ostatní lišící se parametry slouží ke srovnání zvolených dotykových obrobkových sond (Tab. 1.1).



Obr. 1.11: Porovnávané dotykové obrobkové sondy (A – Renishaw OMP 400; B – Heidenhain TS 460; C – Hexagon IRP 40.02; D – Blum-Novotest TC 52) [10,13,14,15].

Tab. 1.1: Porovnání dotykových obrobkových sond [6,10,13,14,15].

Dotyková obrobková sonda	Renishaw OMP 400	Heidenhain TS 460	Hexagon IRP 40.02	Blum-Novotest TC 52
Měřicí mechanismus	Tenzometrický (RENGAGE™)	Optický	N/A	Optický
Přenos signálu	Infračervený			

Rozměry těla sondy	ø40 x 50 mm	ø41 x 54 mm	ø40 x 50 mm	ø40 x 62 mm
Hmotnost (bez upínacího kužele)	0,256 kg	0,200 kg	0,390 kg	0,250 kg
Způsob upevnění	Upínací kužely			
Směry snímání	±X, ±Y, +Z			
Maximální vychýlení	X/Y ±11° Z +6 mm	X/Y ±9° Z +5 mm	X/Y ±12,5° Z +5 mm	X/Y ±11° Z +6 mm
Maximální snímací rychlost	N. A.	5 m·min ⁻¹	2 m·min ⁻¹	2 m·min ⁻¹
Spínací síla	X/Y = 0,06 N Z = 2,55 N	X/Y = 1 N Z = 8 N	X/Y = 0,8 N Z = 5,7 N	X/Y = 2,3 N Z = 0,65 N
Opakovatelnost měření	0,25 µm 2σ	≤ 1 µm 2σ	0,5 µm 2σ	0,3 µm 2σ
Výdrž baterie (nepřetržitý provoz)	105 h	90 h	80 h	N/A
Provozní teplota	5 °C až 50 °C	10 °C až 40 °C	10 °C až 50 °C	10 °C až 40 °C
Stupeň krytí	IP X8	IP 68	IP 68	IP 68

Při pohledu na vybrané obrobkové sondy je zřejmé, že jejich technické parametry jsou velice obdobné. Tento fakt je způsoben vysokou konkurencí a neustálým vývojem na poli měřicích technologií. Všichni výrobci vynakládají nemalé prostředky a úsilí na rozvoj a zdokonalování sond v odborných vývojových centrech.

Z tabulky je v první řadě patrné, že všechny zvolené sondy mají relativně malé, kompaktní rozměry. Díky tomu je i jejich hmotnost nízká. Rozdíl ovšem nastává v oblasti mechanismu měření. Zde díky patentovanému tenzometrickému mechanismu RENGAGE jasně dominuje sonda OMP 400 značky Renishaw. Výhody tohoto mechanismu se projevují vysokou citivostí na dotyk (nejnižší spínací síla) a hlavně nejvyšší opakovatelností měření. Tím je myšlena odchylka naměřené hodnoty při vícenásobném najetí sondy do jednoho měřeného bodu. Opakovatelnost měření pro tuto sondu nabývá úctyhodné hodnoty 0,25 µm pro normální statistické rozdělení 2σ (odpovídá 95,45 % měření). Obdobným hodnotám se přibližuje pouze sonda TC 52 od výrobce Blum-Novotest.

Mezi společné parametry se řadí univerzální možnost výměny upínacího kužele a stupeň krytí zařízení. Právě jeho hodnota je nejvyšší možná tak, aby nemohlo dojít ke znehodnocení sond provozními kapalinami nebo třískami vzniklými při obrábění. Životnost baterií a teplotní oblast provozu se také zásadně neliší.

1.3.2 Porovnání dotykových nástrojových sond

I když odborné CNC pracoviště FSI VUT v Brně nedisponuje dotykovou nástrojovou sondou, bylo postupováno podle stejného klíče. To znamená, že byly vybrány čtyři

sondy tohoto typu od předních světových výrobců (Obr. 1.12). V tabulce (Tab. 1.2) se opět nachází výčet dostupných technických parametrů, které poslouží k porovnání daných sond.



Obr. 1.12: Porovnávané dotykové nástrojové sondy (A – Renishaw AA OTS; B – Heidenhain TT 460; C – Hexagon IRT 35.70; D – Blum-Novotest ZX-Speed IR) [10,14,16,17].

Tab. 1.2: Porovnání dotykových nástrojových sond [6, 10,14,16,17].

Dotyková nástrojová sonda	Renishaw AA OTS	Heidenhain TT 460	Hexagon IRT 35.70	Blum-Novotest ZX-Speed IR
Měřicí mechanismus	Kinematický	Optický	N/A	Optický
Přenos signálu	Infračervený			
Rozměry sondy	136 x 51 x 102 mm	Ø53 x 105 mm	Ø63 x 102 mm	43 x 43 x 86 mm
Hmotnost	0,950 kg	0,400 kg	0,750 kg	0,280 kg
Způsob upevnění	Šroub do T drážky	Upínací kameny	Šroub do T drážky	Šroub do T drážky
Směry snímání	±X, ±Y, -Z			
Maximální vychýlení	X/Y ±3,5 mm Z -6 mm	X/Y ±5 mm Z -5 mm	X/Y ±12,5° Z -5 mm	X/Y ±11° Z -6 mm
Spínací síla	X/Y = 1,3 N Z = 2,4 N	X/Y = 1 N Z = 8 N	X/Y = 2 N Z = 8 N	X/Y = 3 N Z = 5,2 N
Opakovatelnost měření	1 µm 2σ	1 µm 2σ	1 µm 2σ	0,4 µm 2σ
Výdrž baterie (nepřetržitý provoz)	800 h	400 h	400 h	N/A

Provozní teplota	5 °C až 50 °C	10 °C až 40 °C	10 °C až 50 °C	10 °C až 40 °C
Stupeň krytí	IP X8	IP 68	IP 68	IP 68

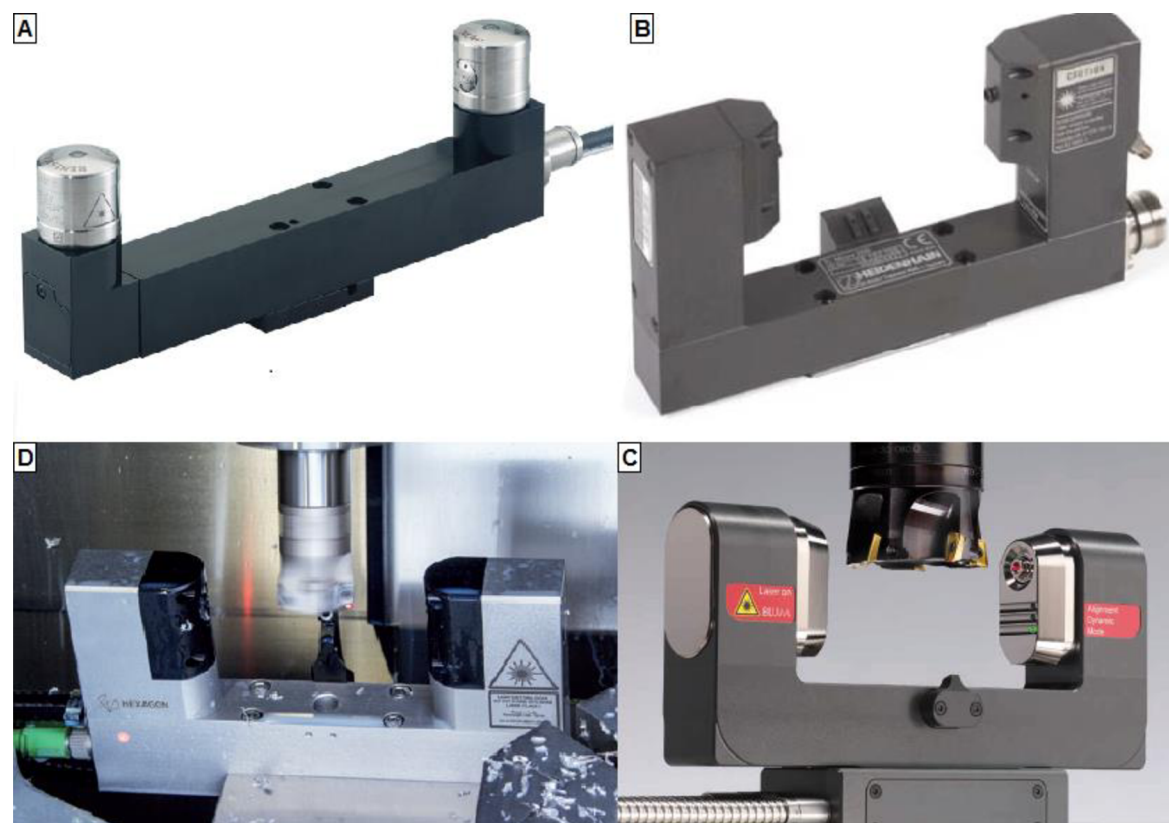
I zde je při pohledu na technické parametry v tabulce jasné, že se jedná o velice podobná zařízení. Ovšem, co se konstrukce týče, je zde jedno dosti odlišné. Zatímco sondy TT 460, IRT 35.70, ZX-Speed IR jsou konstrukčně řešeny tak, že měřicí dotyk (dotykový talíř) je na horní straně sondy, u sondy Renishaw tomu tak není. U této sondy AA OTS je umístěn na její straně, přičemž reakce na dotyk nástrojů jsou do mechanismu sondy přenášeny pomocí pravoúhlého spojovacího čepu.

Rozměry vyniká zejména sonda ZX-Speed IR německé společnosti Blum-Novotest. Ta mezi vybranými dotykovými nástrojovými sondami disponuje nejkompaktnějšími rozměry a nejnižší hmotností. Dále pak předstihuje ostatní sondy v opakovatelnosti měření, kdy tato hodnota dosahuje až 0,4 μm při 2 σ . Nejnižší sílu pro sepnutí spínacího mechanismu potřebuje opět sonda značky Renishaw.

Ostatní technické parametry jsou již veskrze zaměnitelné. Ať už se jedná například o způsob upnutí sondy k pracovnímu stolu stroje, nebo teplot, za který mohou být dané sondy provozovány. Všechny sondy jsou opět vyrobeny tak, aby splňovaly nejvyšší požadavky na stupeň krytí. U tohoto typu sond má tato vlastnost ještě větší váhu, protože tato zařízení jsou po celou dobu procesu obrábění umístěna v pracovní oblasti stroje, přičemž jsou neustále vystavena působení procesních látek.

1.3.3 Porovnání bezdotykových nástrojových sond

Díky letité spolupráci společnosti Renishaw s.r.o. a FSI VUT v Brně je odborné CNC pracoviště vybaveno i laserovou nástrojovou sondou Renishaw NC4. Ta poskytuje léty ověřenou technologii měření a kontroly frézovacích nástrojů. Pro porovnání byly opět vybrány sondy tří konkurenčních výrobců s obdobnými rozměry a parametry (Obr. 1.13).



Obr. 1.13: Porovnávání bezdotykové nástrojové sondy (A – Renishaw NC 4; B – Heidenhain TL Micro 200; C – Hexagon LTS 90 35.65; D – Blum-Novotest LC 50 DIGILOG) [5,10,18,21].

Tab. 1.3: Porovnání bezdotykových (laserových) nástrojových sond [6,10,19,18,20,21].

Laserová nástrojová sonda	Renishaw NC 4	Heidenhain TL Micro 200	Hexagon LTS 90 35.65	Blum-Novotest LC50DIGILOG
Měřicí mechanismus	Laserový			
Přenos signálu	Kabelem			
Ochranná třída laseru	II. třída			
Rozměry sondy	230 x 30 x 77 mm	200 x 30 x 110 mm	200 x 32 x 107 mm	200 x 32 x 89 mm
Hmotnost	1 kg	0,950 kg	1 kg	N/A
Způsob upevnění	Šrouby do T drážky			
Směry snímání	±X, ±Y, +Z			
Maximální Ø nástroje	160 mm	80 mm	85 mm	120 mm

Minimální Ø nástroje	0,03 mm	0,1 mm	0,03 mm	0,02 mm
Opakovatelnost měření	0,1 μm 2 σ	<1 μm 2 σ	0,1 μm 2 σ	0,3 μm 2 σ
Provozní teplota	5 °C až 55 °C	10 °C až 40 °C	10 °C až 50 °C	10 °C až 40 °C
Stupeň krytí	IP X8	IP 68	IP 68	IP 68

I zde je při pohledu na porovnávané laserové sondy (Tab. 1.3) patrné, že se vesměs jedná o velice podobná zařízení. Tento fakt je opět způsoben vysokou konkurencí na trhu laserových sond, zároveň se u všech sond jedná o funkční a prověřenou konstrukci. Je tedy jasné, že vnější robustná konstrukce vytváří pouze obal pro technologii uloženou uvnitř.

Všechny zvolené sondy jsou vybaveny pneumatickým systémem ochrany proti vniknutí nežádoucích látek do útroby sondy. Díky těmto mechanismům zajišťujícím stupeň krytí IP 68 (IP X8) mohou být tyto laserové sondy neustále umístěny v pracovním prostoru obráběcího CNC stroje. Ovšem co se pracovních teplot týče, sonda o společnosti Renishaw s. r. o. opět dosahuje nejvyšších hodnot.

Od velikosti samotné sondy se dále odvíjí maximální a minimální průměr měřeného nástroje. I když je pravdou, že minimální průměr vychází spíše z rozptylu laserového paprsku. V tomto ohledu tedy dosahuje nejlepšího výsledku laserová sonda značky Blum-Novotest LC 50 DIGILOG, která je schopna měřit i miniaturní nástroje o průměru 0,02 mm. Na druhé straně tohoto spektra je pak sonda Renishaw NC 4, která dokáže měřit nástroje až s maximálním průměrem 160 mm.

V oblasti opakovatelnosti měření nejlepších hodnot dosahují sondy Renishaw NC 4 a Hexagon LTS 90 35.65, ty jsou schopny dosáhnout úctyhodné hodnoty 0,1 μm při 95,45 % prováděných měření.

1.3 Dílenská měřidla vhodná pro třískové obrábění

Ve výrobním procesu nastávají situace, kdy je zapotřebí rychlého a dostatečně přesného odečtu požadovaných rozměrů. K těmto činnostem slouží dílenská měřidla. Pověštinou se jedná o analogická nebo digitální měřidla, která jsou schopna pokrýt všechny základní měřicí metody.

V současnosti převládají digitální typy těchto měřidel. Jasnou výhodou digitálních měřidel je jednoduchý odečet naměřených hodnot, odpadá tak nesrovnalosti při odečtu hodnot ze stupnic analogických měřidel. Jedná se ovšem o elektrická zařízení, která jsou citlivá na nečistoty.

1.3.1 Absolutní dílenská měřidla

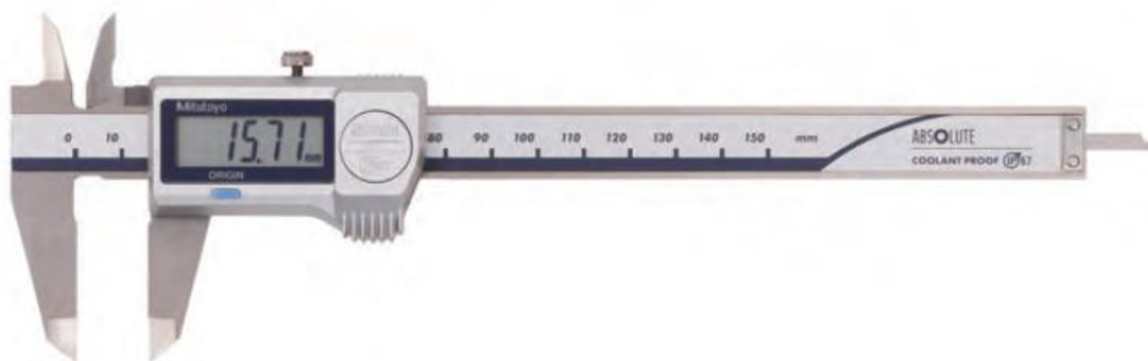
Dílenská měřidla využívající absolutní metody měření lze rozdělit na dvě skupiny dle principu měření. Těmito absolutními měřidly jsou ty na **posuvném principu** a ty na **principu mikrometrického šroubu**. V procesech třískového obrábění se nejčastěji využívají k získávání informací o délkových rozměrech součástí.

1.3.1.1 Měřidla na posuvném principu

Mezi dílenská měřidla na posuvném principu se řadí posuvná měřidla (Obr. 1.14), výškoměry a hloubkoměry. Jedná se o měřidla určená k měření vnitřních a vnějších délkových, hloubkových a výškových rozměrů.

Je možné rozlišovat analogové typy, kdy je naměřená hodnota odečítána pomocí nonia, nejčastěji s rozlišením 0,05 mm nebo 0,02 mm. Zato u digitálních typů měřidel na posuvném principu je nonius nahrazen inkrementálním snímačem a digitálním číselníkem. Rozlišitelnost tohoto typu nabývá nejčastěji hodnoty 0,01 mm.

Výhodou digitálního typu je snadný odečet naměřených hodnot, možnost vynulování měřidla v libovolné pozici nebo propojitelnost s PC [2,22].



Obr. 1.14: Digitální posuvné měřidlo Mitutoyo Absolute 500 [23].

1.3.1.2 Měřidla na principu mikrometrického šroubu

Měřidla na principu mikrometrického šroubu využívají pro měření speciální šroub s velmi malou hodnotou stoupání, díky tomu jsou řádově přesnější než měřidla na posuvném principu. Mikrometrickým šroubem jsou polohovány doteky měřidla. Jsou tedy vhodná pro měření jak vnějších a vnitřních rozměrů součástí, tak i pro měření hloubek a průměrů otvorů. Do této skupiny měřidel se řadí třmenové mikrometry, mikrometrické dutinoměry, dále pak mikrometrické hloubkoměry a odpichy. Všechny tyto typy měřidel jsou vyráběny v analogové i digitální verzi.

Mikrometrický šroub je nejčastěji vyráběn v délce 25 mm. Z tohoto rozměru vyplývá rozsahové odstupňování (0–25 mm; 25–50 mm; 50–75 mm; ...). Analogové typy jsou vybaveny hlavní milimetrovou stupnicí a mikrometrickým noniem. Naopak digitální typy obsahují opět inkrementální snímač a digitální číselník. Rozlišitelnost digitálních mikrometrických měřidel (Obr. 1.15) může být až 0,001 mm [22].



Obr. 1.15: Digitální třmenový mikrometr Mitutoyo Digimatic 293 [23].

1.3.2 Komparační dílenská měřidla

Komparační (porovnávací) měřicí metody jsou rovněž v dílenské praxi hojně využívány. Měřicí zařízení, která spadají do komparačních metod, jsou v zásadě dvoje. Jsou jimi **číselníkové**, potažmo **digitální**, **úchylkoměry** nebo **passametry**. V praxi tedy slouží k porovnávání odchylky (úchylky) od jmenovitého rozměru součásti.

1.3.2.1 Číselníkové a digitální úchylkoměry

Číselníkové úchylkoměry (Obr. 1.16) jsou zařízení sloužící pro přesné komparační měření malých délkových rozměrů. Lineární pohyb dotyku měřidla je převáděn pomocí speciálního mechanismu na rotační pohyb ručičky číselníku. Existuje vícero typů transformačních mechanismů, a to ozubený, pákový, pružinový nebo kombinovaný mechanismus.

Rozlišitelnost úchylkoměrů je nejčastěji 0,01 mm nebo 0,001 mm. U digitálních úchylkoměrů může být i vyšší. Dále pak umožňují propojení s PC, čímž je možné v reálném čase statisticky vyhodnocovat naměřené hodnoty [22].



Obr. 1.16: Číselníkový úchylkoměr Mitutoyo 2046S [23].

1.3.2.2 Měřidla s kombinovaným principem měření

Velice specifickými komparačními měřidly jsou passametry (vnější rozměry) a passimetry (vnitřní rozměry). Jedná se o měřicí zařízení, která kombinují úchylkový ozubený nebo pákový mechanismus s mechanismem na principu mikrometrického šroubu (Obr. 1.17). Samotné měření je prováděno tak, že pomocí mikrometrického šroubu je nastavena jmenovitá hodnota, od které je následně zjišťována odchylka. Tato odchylka je vynášena buď analogově na ručičkovém číselníku nebo je zobrazována digitálně na displeji měřidla. Rozlišitelnost tohoto typu měřidla může nabývat hodnot 0,01; 0,005; 0,002; 0,001 mm [3].

Výhodou tohoto typu měřidla je fakt, že díky mikrometrickému šroubu jej lze využívat i jako třmenový mikrometr. Může tak sloužit k přesnému měření délkových rozměrů absolutní metodou.



Obr. 1.17: Analogový passometr s úchylkoměrem Mitutoyo 510 [23].

1.3.3 Toleranční dílenská měřidla

Pevná dílenská měřicí zařízení jsou využívána právě pro toleranční měřicí metody. Pomocí nich dochází k fundovanému rozhodování, zda daný rozměr splňuje požadované tolerance, či zda nepřekračuje předepsané mezní rozměry. Mezi tyto typy se řadí **kalibry** a **koncové měřky**.

1.3.3.1 Kalibry

Kalibry jsou pevná toleranční měřidla (Obr. 1.18) používaná převážně v sériové výrobě. Neslouží ke zjišťování skutečných rozměrů nebo odchylek, ale pouze k vyhodnocování, zda je určitý prvek výrobku vyrobený v předepsaných tolerancích. Kalibry je možné rozdělit na **netoleranční** (pouze k porovnávání s kontrolovaným kusem) a **toleranční** (dobrá a zmetková strana) [3,22].

V současnosti je možné, v závislosti na způsobu používání, narazit na tři základní druhy kalibrů: **dílenské** (použití převážně ve výrobě), **přebírací** (pro inspekci výrobků zákazníkem) a **porovnávací** (pro zjišťování přesnosti ostatních kalibrů). Při používání kalibrů je nutné brát výrazný zřetel na okolní teplotu v průběhu měření, protože i sebemenší teplotní dilatace kalibru výrazně ovlivňuje výsledek měření [3,22].



Obr. 1.18: Závitový kalibr [24].

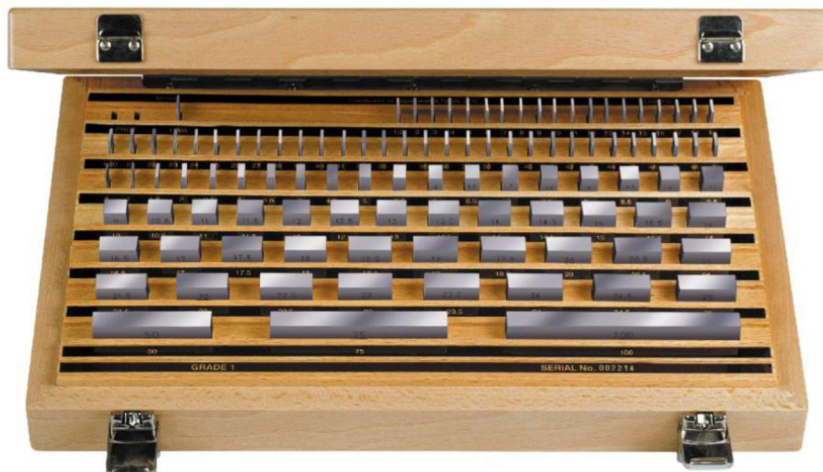
1.3.2.2 Koncové měřky

Koncové měřky (Obr. 1.19) slouží k realizaci určitého délkového rozměru, který slouží pro toleranční hodnocení prvků měřených součástí. Určitý rozměr je vytvářen spojováním (nasáváním) přesně rozměrově a úhlově definovaných hranolů (měrek). Měřky jsou nejčastěji vyráběny z nástrojových ocelí ČSN 19 422, karbidu wolframu nebo z oxidkeramiky. Děje se tak z důvodu potřeby vysokých mechanických vlastností, jako jsou: vysoká odolnost vůči opotřebení, vysoká tvrdost, odolnost vůči

korozí, vysoká stabilita rozměrů nebo malá délková roztažnost. Finální styčné plochy měrek jsou broušeny a lapovány [3,22].

V praxi existují čtyři třídy přesnosti koncových měrek. Ty jsou v závislosti na dané přesnosti a způsobu užívání rozděleny [3,22]:

- třída K – kalibrační koncové měrky,
- třída 0 – etalonové koncové měrky,
- třída K – etalonové/pracovní koncové měrky,
- třída 2 – dílenské koncové měrky.



Obr. 1.19: Kompletní sada koncových měrek [22].

1.4 Moderní trendy v měření

Aplikace myšlenek Průmyslu 4.0 v praxi nutí výrobce měřicích zařízení vyvíjet stále dokonalejší a kompaktnější metrologická zařízení. Tento směr nevychází pouze z technologického pokroku, který silně proniká do oblasti technické metrologie, ale zároveň je způsoben nedostatkem kvalifikovaných průmyslových pracovníků.

Snaha o neustálé zdokonalování měřicích systémů a zařízení společně se snahou o vyrovnání deficitu chybějících pracovníků jsou hlavním motorem vývoje těchto automatizovaných zařízení. Již dnes představuje výroba automatických měřicích systémů a zařízení pro nejednu společnost hlavní gró jejího výrobního portfolia.

Na následujících příkladech jsou demonstrovány moderní trendy, kterými se strojírenská, potažmo průmyslová metrologie vydává.

1.4.1 Automatické kontrolní/měřicí systémy

Automatické kontrolní systémy představují další mílový krok směrem k plně automatizované strojírenské výrobě. Hlavním nositelem inovativních myšlenek v této oblasti je společnost Renishaw s.r.o. Ta na trh uvedla dvojici automatických kontrolních (měřicích) robotů, nesoucí obchodní označení Equator™ 300 (Obr. 1.20) a novější Equator™ 500.

Jedná se o měřicí zařízení vhodná do středně až velkosériové výroby, kde mohou být plně využity jejich vlastnosti. Pracovní prostor robotů představuje pomyslný válec o rozměrech $\varnothing 300 \times 150$ mm u modelu Equator™ 300 a $\varnothing 500 \times 250$ mm u modelu Equator™ 500. Oba modely existují i ve verzi s vyvýšenou základovou deskou (posun 150 mm v ose +Z), tyto modely jsou označeny přízviskem Extended Height [25].

Přednosti těchto robotů tkví v jednoduchosti ovládání (práci se zařízením by měl zvládnout i méně zručný operátor), vysoké robustnosti (měřené dílce mohou dosahovat hmotnosti až 100 kg), vysoké měřicí rychlosti (až $12 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), vysokém rozsahu měření (5 až $50 \text{ }^\circ\text{C}$) a možnosti automatických korekcí rozměrových odchylek v programu obráběcího CNC stroje. Tyto korekce jsou prováděny i s přihlédnutím na okolní teplotu v průběhu měření. Software zařízení automaticky kalibruje tak, aby byla zajištěna nadstandardní přesnost po čas celodenního provozu [26].

Pohybový mechanismus robota je zajišťován pomocí trojice táhel, která pohybují měřicí hlavou robota osazenou tříosou měřicí kinematickou sondou Renishaw SP 25. Táhla jsou zároveň vybavena odměřovacím systémem, jenž slouží k přesnému určení polohy zaznamenávaného bodu [25].

Princip měření pomocí automatických kontrolních systémů Equator™ je založen na porovnávání polohy nadefinovaných bodů na povrchu měřeného tělesa. Polohy těchto bodů jsou porovnávány s body na vzorovém tělese nebo 3D modelu. Naměřené hodnoty jsou následně vyhodnoceny a je rozhodnuto, zda daný rozměr vyhovuje, či ne. V dalším kroku přichází případná úprava korekcí v řídicím programu obráběcího CNC stroje, aby následující obrobek splňoval veškeré rozměrové požadavky [27].



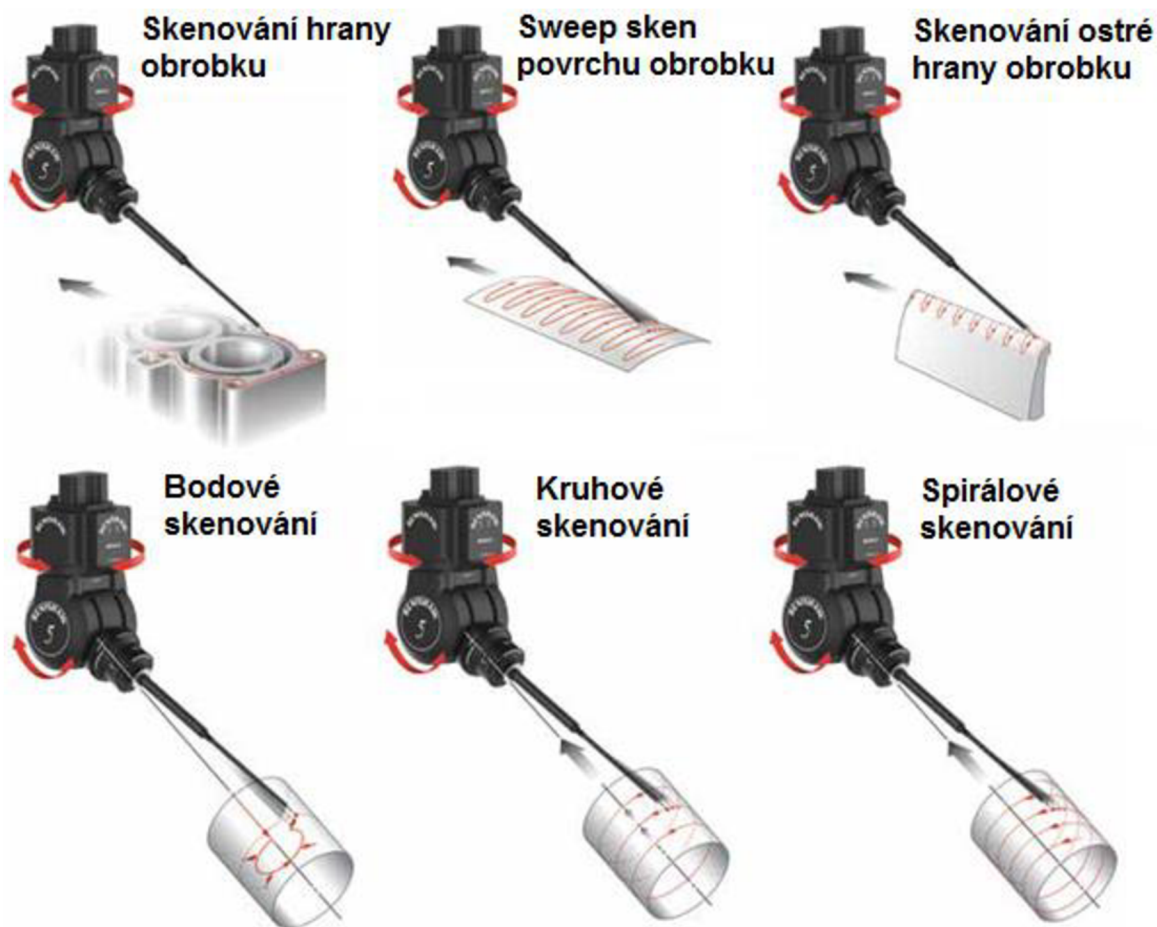
Obr. 1.20: Automatický měřicí systém Equator™ 300 [8].

1.4.2 Měřicí pětiosé systémy

Stále se zdokonalující technologie umožňují výrazný posun i v oblasti automatického více osového měření. Dnes již standardní tříosé měřicí systémy jsou postupně v praxi nahrazovány systémy univerzálnějšími. Pětiosé měřicí systémy představují moderní a rychlý způsob zjišťování a kontroly rozměrů vyráběných součástí (Obr. 1.21).

Modulární pětiosý měřicí systém Revo™ od společnosti Renishaw s.r.o. je právě to zařízení, které zvyšuje výkonnost měření, čímž zároveň výrazně snižuje objem prostojů ve výrobě, přičemž eliminuje neduhy tříosých systémů vyplývajících

povětšinou z vysoké dynamické náročnosti na tato zařízení. Jako celek poskytuje vysoce komplexní řešení posuzování produktových výrobků [8].



Obr. 1.21: Vybrané strategie pětiosého skenování [28].

Největší předností tohoto systému je jeho modulárnost (Obr. 1.22). Jediné zařízení tohoto typu může díky výměnným funkčním prvkům zastat práci několika dalších metrologických zařízení. Pětiosý systém RevoTM je schopný měřit všechny myslitelné geometrické tvary, složité kontury i otvory až do hloubky 800 mm. Další oblastí uplatnění je přímé měření drsnosti obrobených povrchů. Poslední z řady připojitelných modulů je optická sonda, která slouží k bezdotykovému měření subtilních, lehkou deformovatelných součástí [28].

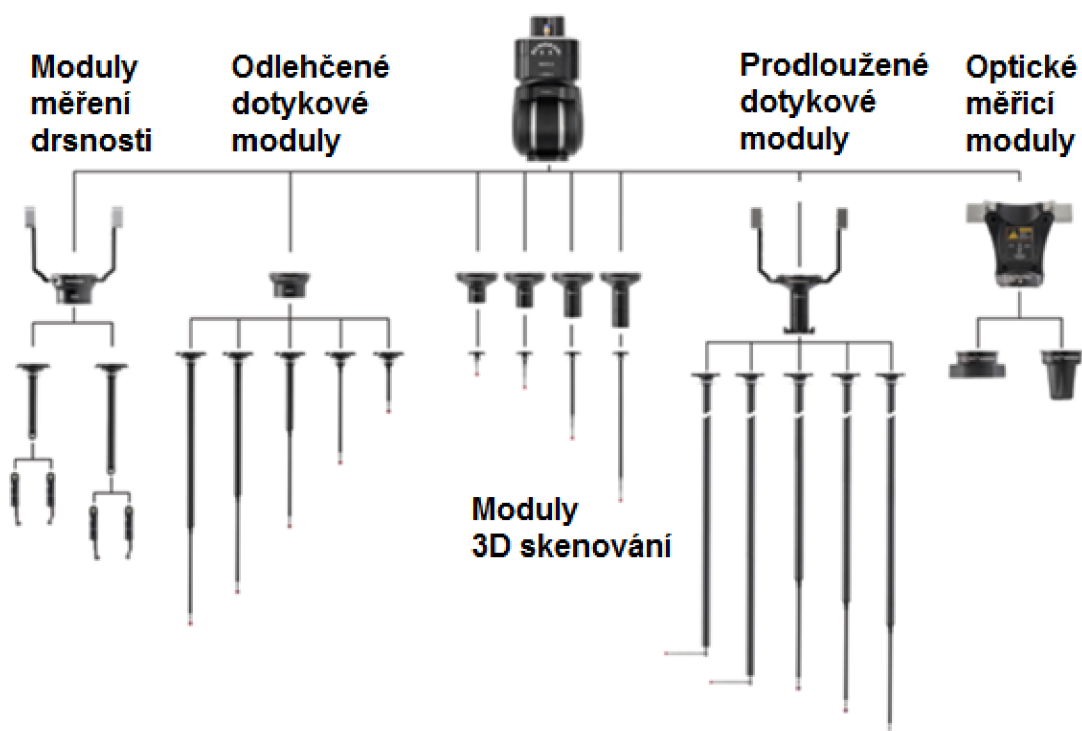
Jednotlivé moduly se svým principem měření liší. Jednotlivým prvkem celého systému je měřicí hlava RevoTM, která tvoří základnu pro jednotlivé moduly. Dynamická skenovací hlava (Revo-2) umožňuje pohyb ve vedlejších osách A a B a při měření drsnosti povrchu i v ose C. Díky tomu zajišťuje rychlé polohování a snímání bodů (až 4000 bodů za vteřinu) s vysokou přesností. Pohyb modulární hlavy je vyvozován pomocí bezkartáčových motorů a kulových vzduchových ložisek [8,28].

Moduly pro dotyková snímání (RSP2 a RSP3) umožňují trojrozměrné spínací měření. Jsou vybaveny výměnitelnými přímými snímacími dotyky až do délky 500 mm, nebo dotyky lomenými. Speciální hloubkové moduly RSP 3-6 podporují dotyky dlouhé až 800 mm. Přičemž i přes úctyhodnou délku dotyku nepřesahuje odchylka měření tvarových ploch 10 μm a 5 μm u měření průměrů [8,28].

Moduly určené pro měření drsnosti povrchu SFP2 umožňují měření přímo v měřicím souřadnicovém stroji. Díky tomu mohou být tyto sekvence automaticky

zařazeny přímo do měřicích cyklů. Pětiosá technologie s sebou nese možnost napohování měřicího hrotu i do těžko přístupných míst výrobku. Tato možnost značně zrychluje celý proces měření vyrobených součástí [8,28].

Optické sondy RVP jsou posledním z řady automaticky vyměnitelných modulů dostupných v tomto uceleném systému. Sondy jsou vybaveny snímači CMOS. Ty společně s LED diodovým osvětlením a vyhodnocovacím softwarem vytváří podmínky pro kvalitní a spolehlivé pořizování měřicích snímků [8,28].

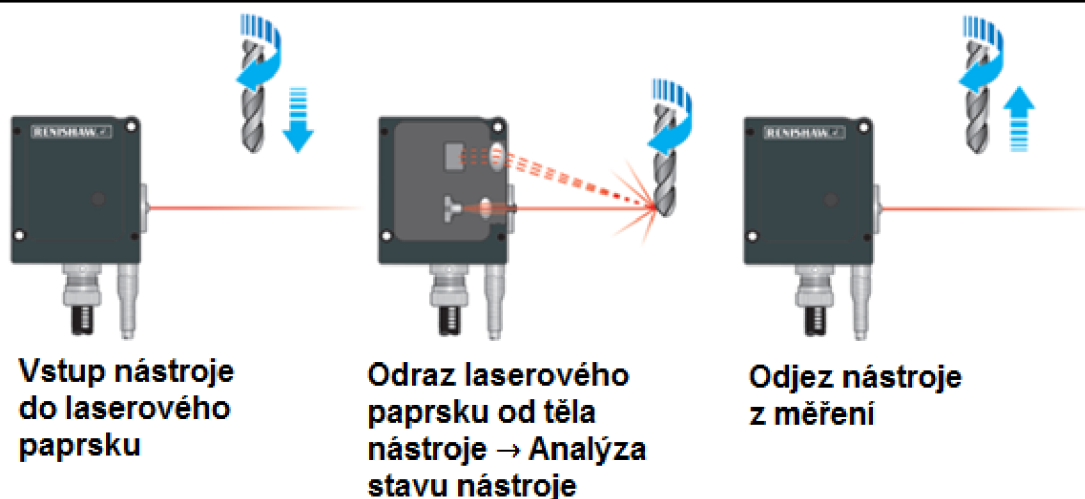


Obr. 1.22: Přehled výměnných modulů pětiosého systému Revo™ [28].

1.4.3 Jednostranné laserové systémy

Dobrá kondice obráběcího nástroje je jedním z zásadních faktorů ovlivňující výslednou přesnost a kvalitu obrobků výroby. Detekce toho, zda není daný obráběcí nástroj poškozený, představuje důležitý krok celého obráběcího procesu. Touto problematikou se zabývají nástrojové sondy, ať už dotykové nebo bezdotykové (laserové). Další možností je pak použití jednostranného laserové detekčního systému.

Systémy jednostranné laserové detekce (Obr. 1.23) jsou zařízení, která pomocí jednostranného laserového paprsku detekují poškození obráběcích nástrojů. Činí tak pomocí laserového paprsku (ochranná třída laseru: II. třída), který je v zařízení emitován a vychází vně ze štěrbin v těle zařízení. Laserový paprsek dopadá na měřený nástroj, a jeho část se odráží zpět k zařízení, kde je zaznamenávána pomocí optického fotodetektoru. Zde dochází k jejímu vyhodnocení a automatickému rozhodnutí o stavu nástroje [8].



Obr. 1.23: Schéma měření jednostranného laserového systému [8].

Konstrukční výhodou těchto systémů jsou kompaktní rozměry a možnost umístění mimo pracovní stůl obráběcího stroje. Jinak poskytují možnost detekce nástrojů o minimálním průměru 0,2 mm, při vzdálenosti 300 mm od zařízení. Přičemž maximální vzdálenost, kdy je detekce ještě možná, činí celé 2 m. Na tuto vzdálenost se ovšem výrazně snižuje přesnost zařízení. Detekce poškození vždy probíhá za výrobních otáček (maximálně $5\,000\text{ min}^{-1}$), a to v rozmezí teplot 5 až $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Celé zařízení je pak vyrobeno, aby jeho stupeň krytí byl IP X8. Toto krytí mu poskytuje dokonalou ochranu před negativním působením provozních kapalin [29,30].

Jednostranné laserové detekční systémy jsou schopny detekovat rozmanitý sortiment rotačních obráběcích nástrojů. Rychlá a vysoce přesná detekce jejich poškození umožňuje výrazné zrychlení práce s obráběcími nástroji, v návaznosti na to snižuje vedlejší strojní časy a zamezuje prostojům ve výrobě [6,8].

2 NÁVRH TESTOVACÍHO OBROBKU A TECHNICKÉ DOKUMENTACE

Testovací obrobky jsou důležitým pomocníkem v mnoha oblastech strojírenské výroby. Nejenže mohou sloužit jako marketingový materiál, na kterém jsou předváděny schopnosti a vlastnosti nabízených obráběcích strojů, ale mohou rovněž sloužit jako cenný pomocník při sledování kvality a časové náročnosti třískového obrábění v požadované přesnosti. Posledním příkladem jejich možného využití jsou pak případy, kdy mohou být na testovací obrobky aplikovány softwarové funkce počítačových měřicích programů. Díky tomu a následnému převedení do praxe je napomáháno zrychlování, zdokonalování a zpřesňování procesu třískového CNC obrábění.

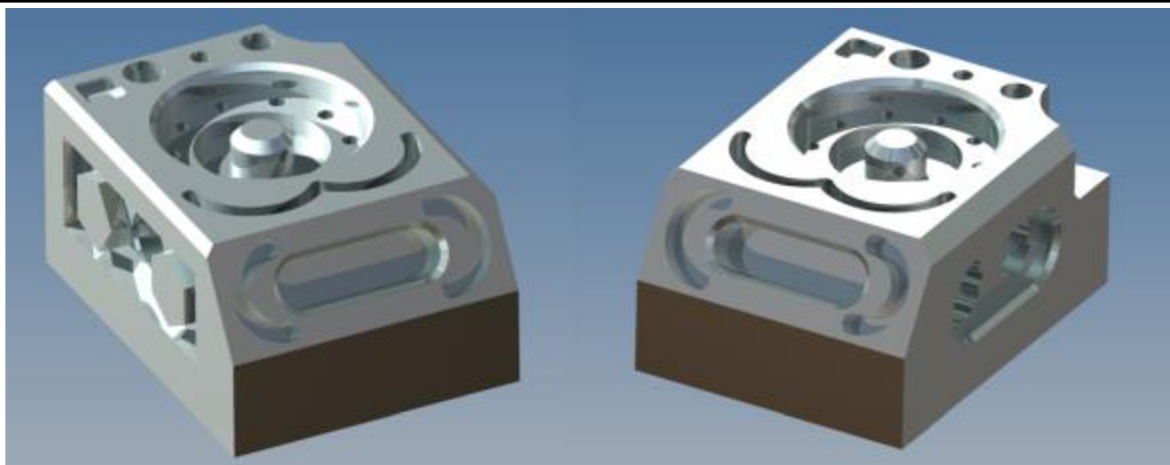
Z tohoto důvodu bylo nutné pro potřeby práce s programem Productivity+™ navrhnout specifický testovací obrobek. Ten ovšem musí splňovat dva základní požadavky. Zaprvé je nutné, aby se jednalo o tvarově rozmanitý obrobek, který je schopný prověřit všechny možnosti měřicích softwarů a sond. Zároveň však musí být vyrobitelný na obráběcím CNC centru MCV 1210. Právě vytváření automatických měřicích cyklů v softwaru Productivity+™ a jejich implementace do obráběcího procesu je náplní následujících kapitol. Měřicí program společnosti Renishaw s.r.o byl pro tuto aplikaci vybrán záměrně, a to z důvodu blízké spolupráce této společnosti s Odborem technologie obrábění, FSI, VUT v Brně.

2.1 Design testovacího obrobku

Testovací obrobek, potažmo jeho 3D model, byl vytvořen v CAD softwaru Autodesk Inventor. Jedná se o jeden ze světově nejrozšířenějších programů svého druhu, a poskytuje veškeré myslitelné funkce potřebné pro vytváření technických modelů a výkresové dokumentace. Samotný model testovacího obrobku je kvádr, který je posetý množstvím tvarových a rozměrových prvků. Při vytváření tohoto modelu obrobku byla vynaložena snaha, aby dané prvky sloužily pro vzorovou aplikaci principů a funkcí dnešních měřicích softwarů, a hlavně měřicích sond.

Samotný jeho návrh byl inspirován testovacími obrobky renomovaných strojírenských firem. Jako vzory posloužily testovací obrobky firem Renishaw s.r.o. a Blum-Novotest s.r.o. Právě tyto testovací obrobky představují kvalitní, léty prověřené etalony strojního 3D měření.

Finální testovací obrobek (Obr. 2.1) tedy představuje kompletní model, na jehož tvarových a rozměrových prvcích jsou aplikovány funkce měřicího programu Productivity+™. Mezi těmito prvky je možné nalézt například hluboké kruhové otvory, tvarové drážky, mnohoúhlé čepy, mezikruží, kužele nebo kruhová pole.



Obr. 2.1: Detaily navrženého testovacího obrobku.

Rovněž byl kladen důraz, aby se jednalo o obrobek, který plně využívá funkce a možnosti naklápěcího rotačního pracovního stolu CNC obráběcího centra MCV 1210. Zároveň je pro měřicí operace používána dotyková obrobková sonda Renishaw OMP 400 vybavená pouze jednoduchým single dotykem. Z tohoto důvodu je využívána právě programovatelná rotace a naklápění pracovního stolu stroje. Je tak možné pomocí jednoduchého single dotyku měřit i tvarová zhloubení na bočních stranách testovacího obrobku. Programování G-kódu řídicího obráběcího centra je taktéž obsaženo v této práci.

2.1.1 Aplikované tvarové prvky

Při volbě tvarových prvků, které jsou aplikovány na testovací obrobek bylo bráno v potaz to, jak se obdobné prvky vyskytují v průmyslové výrobě. Na testovacím obrobku je tedy možné nalézt poměrně velké množství těchto tvarových a rozměrových prvků.

Horní straně obrobku dominuje velké stupňovité kruhové vybrání se středovým čepem. Toto vybrání slouží převážně pro testování schopností měření souososti a soustřednosti obráběných kruhových prvků a ploch. Vybrání rovněž obsahuje skupinu hlubokých otvorů umístěných v kruhovém poli, to simuluje tvar příruby. Zde je zapotřebí s vysokou přesností určit nejenom polohu těchto děr, ale také jejich hloubku a kolmost vzhledem k jejich základně. Na horní straně obrobku se dále nachází dlouhá složená tvarová drážka. Ta má za úkol prověřit možnosti obrobkových sond měřit kruhové segmenty, a to v poměrně stísněném operačním prostoru. Posledními tvarovými prvky tři kruhové otvory různých průměrů, čtvercový otvor a rohové vybrání.

Přední zkosená strana obrobku poskytuje prostor pro další, tentokrát poměrně širokou drážku. Tato drážka slouží jako testovací prvek pro měření rovinnosti jejího dna. Rovněž se zde nacházejí dvě půlkruhové tvarové drážky. Celé toto zkosení má za úkol prověřit možnosti natočení a naklopení pracovního stolu pětiosého frézovacího centra a možnosti aplikace měřicích sond na tomto typu obráběcího stroje.

Na zadní straně obrobku se nacházejí pouze tři jednoduché tvarové prvky. Přesněji se jedná o rohové vybrání, elipsový otvor a malý kužel s navazující válcovou podstavou. Tyto prvky, zejména pak elipsa s kuželem jsou dalšími z řady aplikovaných tvarů, které slouží k prověřování schopností daných sond a ovládacích softwarů.

Levá boční strana, tedy strana, na které se nachází nulový bod jak obrábění, tak i měření, je osazena velkým obdélníkovým vybráním, které obsahuje další tvarové prvky. Těmito prvky jsou dva mnohoúhelníky a jeden tvarový otvor. I zde je opět kladen

důraz na tvarovou rozmanitost a možnost využití otočného a naklápěcího pracovního stolu pětiosého frézovacího centra MCV 1210. Zároveň mnohoúhelníky představují v průmyslové výrobě často využívané tvary.

Opačná, tedy pravá strana testovacího obrobku je opět osazena výrazným tvarovým vybráním. Zde se jedná o oválnou kapsu, která je ještě ve dvou místech dále prohloubena. Prohloubené kruhové otvory jsou vybaveny rozličným počtem zakulacených zubů. Ty slouží pro simulaci měření vnitřních ozubení, nebo možných drážkovaných spojů hřídelí.

Všechny zvolené prvky mají svůj reálný průmyslový předobraz, a byly navrženy tak, aby došlo k plnému prověření vlastností a schopností měřicích obrobkových sond a také k prověření programovacích softwarů k tomu určených.

2.1.2 Materiál testovacího obrobku

Volba materiálu testovacího obrobku je dalším z řady kroků jeho celkového návrhu. Při výběru daného konstrukčního materiálu bylo bráno v potaz vícero faktorů. Jelikož se jedná, v uvozovkách, pouze o testovací obrobek, který bude využíván pro aplikaci měřicích cyklů a operací, není nutné, aby zvolený materiál dosahoval jedinečných, až přehnaně vysokých materiálových a mechanických vlastností. Pro tuto aplikaci jsou nutné odlišné vlastnosti. Zvolený materiál by měl být dobře obrobitelný, dále dostatečně pevný, měl by dosahovat přijatelné tvrdosti a v neposlední řadě by měl být tvarově stálý. Tvarová stálost je ovšem poměrně diskutabilní. Právě nepatrné změny tvarů a rozměrů obrobku mohou dokonale prověřit citlivost měřicích sond na tyto změny.

Samotná teplotní roztažnost je velkým nepřítelem přesného měření. V praxi jsou prakticky všechna přesná měření prováděna na pracovištích OTK (Odbor technické kontroly), kde jsou veškeré měřicí operace prováděny v izolovaných a klimatizovaných prostorech, a to právě z důvodu vytvoření stálého a opakovatelného prostředí. U měřicích sond tyto požadavky ovšem nelze vždy naplnit. Z tohoto důvodu jsou sondy vybaveny mechanismy, které se snaží nepřesnostem vzniklým teplotní roztažností předejít.

Jako konstrukční materiál pro testovací obrobek byla zvolena slitina hliníku nesoucí označení ČSN 42 4203. Hliník a jeho slitiny jsou v technické praxi hojně využívaným konstrukčním materiálem. Toto postavení si vydobyl hlavně díky kombinaci vynikajících mechanických vlastností s poměrně nízkou měrnou hmotností (Tab. 2.1). Díly z tohoto materiálu opracované pomocí CNC technologií lze nalézt například v raketoplánech, dopravních letadlech nebo v i mobilních telefonech.

Tab. 2.1: Tabulka mechanických vlastností [31,32].

Norma značení		
Norma ČSN	42 4203	
Norma DIN	3.1355	
Norma ČSN EN	AW 2024	
Mechanické vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Mez kluzu R_e	76	MPa
Mez pevnosti R_m	186	MPa
Tažnost A	22	%

Tvrđost	47	HB
Hustota ρ	2 712	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Modul pružnosti v tahu E	71,7	GPa
Modul pružnosti v smyku G	26,9	GPa

2.1.2 Technická dokumentace obrobku

Technická dokumentace testovacího obrobku byla vytvořena v dalším programu z rodiny programů Autodesk, konkrétně v programu Autodesk AutoCAD. Opět se jedná o široce rozšířený CAD software, jenž je využíván konstruktéry po celém světě.

Zmíněná technická dokumentace byla vytvořena jako podklad pro práci s měřicími programy, kde slouží k aplikaci měřicích cyklů a funkcí. Stejně jako vytvořený 3D model navržené součásti byl využit pro aplikaci měřicích cyklů a funkcí v programu Productivity+TM, tak i technická dokumentace našla své uplatnění při vytváření komplexního obráběcího programu v softwaru Sinumerik ShopMill a následnou aplikaci měřicích operací.

Vytvoření této technické dokumentace je základní součástí celé diplomové práce a je možné ji naléznout i jako její fyzickou součást (Příloha 1).

3 MĚŘENÍ NA FRÉZOVACÍM CNC STROJI MCV 1210

Problematika implementace měřicích cyklů přímo do NC kódu obrábění s sebou nese i některá úskalí. Na jedné straně značně zvyšuje přesnost, kvalitu a produktivitu práce na obráběcích CNC centrech, na druhou stranu se ozývají i negativní ohlasy, které přínosy těchto technologií zpochybňují. Tyto negativní postoje se dají rozdělit do dvou hlavních proudů.

První problematický aspekt je čistě technického ražení. Značnou nevýhodou dotykových měřicích obrobkových sond je fakt, že jejich přesnost měření se přímo odvíjí od přesnosti polohování daného obráběcího centra. Tudíž pokud je stroj, na které jsou tyto sondy používány, špatně geometricky seřízen nebo je lidově řečeno „nabořen“, tak se tyto nepřesnosti přenášejí celým procesem výroby až do samotného měření. Takto vyrobená součást se může zdát jako vyrobená kvalitně s vysokou přesností, ale fakt je, že se může jednat o neshodný díl, který může být v krajních případech neopravitelný.

Druhým aspektem je smýšlení některých pracovníků výroby, ať už se jedná o vedoucí pracovníky, technology nebo pracovníky obsluhující stroje. Jejich názorem je fakt, že stroj by měl v první řadě vyrábět, a nezaobírat se věcmi, které jsou primárně vykonávány na pracovištích OTK. Tyto často zastaralé názory se mohou zdát relevantní, pro správné zhodnocení je ovšem nutné uvědomit si veškeré výhody měřicích sond.

Jelikož hlavním cílem práce je vytvoření podrobných vzorových postupů a doporučení pro aplikaci měřicích cyklů do procesu obrábění na obráběcí CNC centrum MCV 1210, byly zvoleny takové programy, které tuto implementaci podporují. Přesněji se jedná o programy vyvinuté předními výrobci strojního měřicího vybavení nebo aplikace přímo zabudované v řídicím programu obráběcího stroje.

3.1 Technické specifikace MCV 1210

Pro aplikaci zmiňovaných měřicích sond do reálného procesu CNC obrábění je využito portálové obráběcí CNC centrum MCV 1210 (Obr. 3.1). Toto vertikální pětiosé CNC centrum je vyráběno zlínskou firmou Tajmac-TPS, a.s. Již v základní výbavě disponuje otočným a naklápacím pracovním stolem. CNC centrum bylo navrženo pro vysoce produktivní obrábění tvarově složitých výrobků za využití tří nebo pětiosé technologie (Tab. 3.1). Toho je využíváno zejména při výrobě forem lisů pro automobilový nebo letecký průmysl. Zároveň díky vysoké dynamické stabilitě a neobyčejné tuhosti skloubené s vysokou přesností obrábění může být MCV 1210 využito i pro technologie HSC obrábění. Jako řídicí software je zde použit systém SINUMERIK 840D pl [33,34].



Obr. 3.1: Pětiosé obráběcí CNC centrum MCV 1210 [34].

Konstrukce tohoto obráběcího centra je tvořena portálem typu horní gantry. Rám portálu se skládá z dvojice bočnic, jež jsou pevně spojeny se základnou centra. Na jejich horní ploše jsou pak umístěna lineární vedení pro pojezd příčnicku. Na stejném místě se rovněž nachází i kuličkové šrouby pohonu osy Y a její odměřovací pravítka. Pohyb v ose X je realizován pomocí pojezdových předsazených saní. Ty jsou opatřeny kuličkovými šrouby s minimálním vyložením a nacházejí se na straně příčnicku. Vnitřní prostor saní je vyplněn mechanismem pohybu smýkadla osy Z. O tento pohyb se stará dvojice vozíků lineárního vedení [35].

Tab. 3.1: Vybrané technické parametry stroje MCV 1210 [34,36].

Osový pracovní pojezd X/Y/Z	1000/800/600 mm
Přesnost polohování	0,008 mm
Opakovatelnost polohování	0,006 mm
Maximální pracovní posuv	20 m·min ⁻¹
Maximální otáčky vřetene	18 000 min ⁻¹

Maximální výkon vřetene	31 kW
Rozměr upínací plochy stolu	Ø600 mm
Maximální hmotnost obrobku	500 kg
Maximální počet nástrojů	30 ks

Kompletní technické parametry obráběcího CNC centra MCV 1210 je možné nalézt v Příloha 2.

3.2 Vybraný NC měřicí software

Při aplikaci měřicích sond do procesu CNC frézování (obrábění) mohou nastat situace, kdy dochází ke kolizi těchto sond s obrobkem či segmentem obráběcího stroje. Pověšinou se tak stává kvůli nepozornosti obsluhy obráběcího stroje nebo kvůli chybě v řídicím programu obrábění. Tyto kolize jsou velice nežádoucí a v důsledku mohou způsobit vysoké finanční škody. Z tohoto důvodu je kladena velká pozornost na bezchybnou a bezpečnou práci s těmito sondami.

Prevenici před těmito událostmi představují simulační počítačové programy. Tyto NC měřicí softwary umožňují naprogramování a následnou simulaci práce měřicí sondy. Všechny potřebné operace je tedy možné vyzkoušet a odladit ještě před začátkem samotného procesu obrábění. Díky této skutečnosti lze obrábění a následné měření provádět přímo na obráběcím CNC stroji. To vše beze strachu z případných kolizí nebo poruch, které mohou znamenat poškození či úplné zničení měřicí sondy [37].

3.2.1 Měřicí software Productivity+™

Software Productivity+™ je počítačový program společnosti Renishaw s.r.o. sloužící k programování a simulaci práce měřicích obrobkových a nástrojových sond. Program umožňuje tvorbu nebo editaci měřicích cyklů, které mohou být implementovány do již existujících NC programů nebo slouží jako součást programů nových [8,37].

Samotný software je možné uplatnit ve třech důležitých oblastech procesu obrábění, a to vždy v závislosti na jeho aktuálním stavu. Tyto oblasti jsou:

- **Oblast prediktivního nastavení** – zde je možné nastavovat a simulovat činnosti, které spadají do předvýrobní fáze procesu. Je tedy možné navrhovat cykly starající se o ustavování obrobků, jejich identifikaci a také identifikaci nástrojů.
- **Oblast aktuální mezioperační kontroly** – tedy činnosti, které slouží k vyhodnocování probíhajícího procesu obrábění. Jedná se o sledování stavu nástrojů, aktualizaci jejich rozměrů a tolerancí, nebo rozhodování o opětovném obrábění při zjištění rozměrové nebo tvarové neshody.
- **Oblast informativního reportování** – ta nastupuje až po dokončení procesu obrábění. Umožňuje programovat cykly, které se zaměřují na finální vyhodnocování přesnosti tvarů a rozměrů. Poskytuje možnost vytvoření měřicího protokolu, jenž slouží jako informativní základ pro další postupy výroby.

Všechny tyto oblasti společně tvoří ucelený programovatelný systém a poskytují možnost zajištění plynulé implementace měřicích cyklů do procesu obrábění [6].

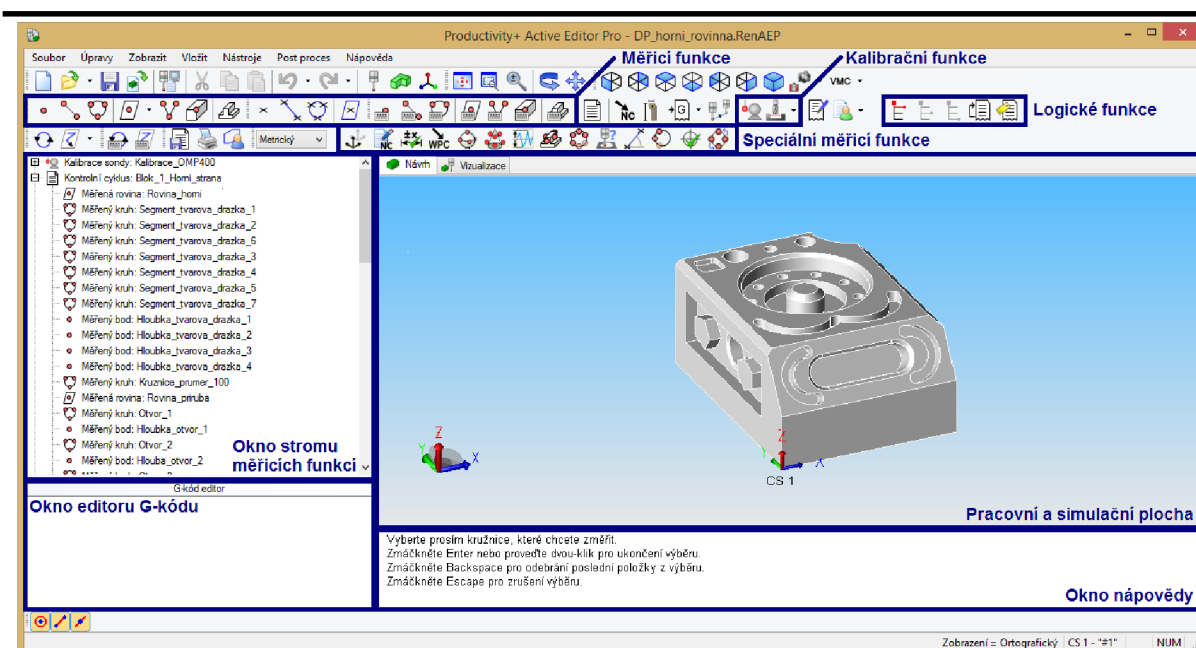
Měřicí cykly jsou v programu vytvářeny v uživatelsky přívětivém grafickém intuitivním prostředí. Základem pro vytvoření měřicího cyklu je 3D model součásti. Ten je nainportován do programu a pomocí dialogových oken dochází k přiřazování jednotlivých měřicích procesů na konkrétní prvky součásti. Po dokončení je pomocí postprocesoru vygenerován výstupní kód, který je připraven pro načtení do řídicího počítače daného obráběcího CNC stroje [37].

Firma Renishaw nabízí k dispozici dvě verze tohoto programu. První verzí je **Productivity+™ Active Editor Pro**. Tento samostatný PC program podporuje plnohodnotnou práci s 3D modely součásti a nepřebornou paletu měřicích funkcí. To celé v intuitivním prostředí ovládaném pomocí myši počítače. Díky tomu se jedná o velice uživatelsky přívětivý PC program. Druhou dostupnou verzí je pak **Productivity+™ GibbsCAM plug-in**. Zde se jedná o rozšiřující plug-in komponent do CAM programu. Tento program rozšiřuje o měřicí funkce, přičemž se sondami zachází stejně jako s obráběcími nástroji. Z toho pramení možnost snadného programování měřicích cyklů společně s ostatními operacemi [6,37].

3.2.1.1 Uživatelské rozhraní

Jak již bylo zmíněno výše, program Productivity+™ poskytuje možnosti tvorby komplexních měřicích cyklů nebo jejich případnou editaci. Uživatelské rozhraní je tomu náležitě uzpůsobeno. Samotná tvorba měřicích cyklů a jejich editace probíhá pouze za použití počítačové myši. Její pomocí jsou jednotlivé měřicí cykly implementovány na dané prvky importovaného 3D CAD modelu měřené součásti. Tímto způsobem jsou postupně vytvářeny strukturované měřicí bloky, popisující všechny měřené prvky součásti. Pro tyto bloky program automaticky vytváří posuvové dráhy, přičemž zároveň svědomitě hlídá, aby nedošlo ke kolizi sondy s obrobkem. Tyto dráhy je také možné editovat, a vytvářet tak celistvé, na sebe navazující, komplexní cykly.

Pracovní plocha programu (Obr. 3.2) je rozdělena na čtyři základní pole. Dominantní je oblast zobrazující 3D model součásti, na který jsou měřicí cykly aplikovány. Program podporuje většinu formátů na trhu dostupných CAD modelátorů. Nachází se tu ale také možnost přepnutí do simulačního režimu. V něm je možné si program plně přizpůsobit požadavkům obsluhy. Tudíž se zde nachází možnost výběru sondy značky Renishaw s.r.o. a výběru všeho dostupného příslušenství, a to všechno za účelem přesné simulace. V horní části pracovní plochy se pak nachází nabídka funkcí programu. Tato nabídka se dále dělí na podoblasti, které se zaměřují na určité funkce. Je zde tedy možné nalézt menu měřicích cyklů, menu zobrazení, kalibrační menu a další funkce.



Obr. 3.2: Pracovní plocha programu Productivity+™.

Zbytek pracovní plochy zabírají dvě dialogová okna v její levé části. Tím prvním je okno zobrazující pracovní strom měřicích cyklů. Zde se zobrazuje výčet použitých měřicích cyklů a také případná upozornění na nesrovnalosti nebo kolize v programu. Toto okno rovněž umožňuje přesuny jednotlivých měřicích cyklů nebo doplňování instrukcí a informací potřebných pro správný chod měřicích cyklů v programu.

Poslední částí pracovní plochy je pak okno editace G-kódu. Právě v této části lze vytvořený nebo nahraný G-kód editovat či doplňovat o nové měřicí úseky. Následný výstup skrze postprocesor je posledním krokem celé přípravné fáze měřicích cyklů.

3.2.1.2 Měřicí funkce

Software Productivity+™ obsahuje nespočet měřicích nebo kontrolních funkcí. Tyto funkce lze snadno rozdělit do tří základních kategorií. První kategorií jsou funkce věnující se měření tvarových a rozměrových prvků obrobku. Zato druhá kategorie měřicích, v tomto případě spíše kontrolních, funkcí se zaměřuje na práci s obráběcími nástroji. Poslední kategorií jsou funkce speciální. Ty se věnují různým specifickým prvkům nebo se zaměřují na kontrolu rozměrových a tvarových tolerancí.

Všechny funkce aplikované na obrobek se dále v programu vyskytují ve třech variantách, jedná se o měřené, konstruované a základní funkce (Obr. 3.3). Rozdíl mezi těmito variantami měřicích funkcí spočívá v implementaci na 3D model kontrované součásti. Funkce měření jsou implementovány pomocí kliknutí počítačovou myší na zvolený tvarový prvek, který je měřen. Po označení příslušného prvku se objeví dialogové okno, kde jsou upřesněny informace pro korektní měření. Funkce označené jako konstruované slouží k vytváření měřicích operací, které nejsou přímo navázány na tvarový prvek obrobku, tento měřený tvar je zadáván souřadnicově v dialogovém okně. Poslední variantou měřicích obrobkových funkcí jsou funkce základní. Ty představují kombinaci předchozích variant, kdy je měřicí funkce implementována na tvarový prvek 3D modelu. Ovšem samotná implementace probíhá zadáváním souřadnic tvarového prvku do příslušného dialogového okna.



Obr. 3.3: Porovnání ikon základních kategorií funkcí (A – Měřené funkce, B – Konstruované funkce, C – Základní funkce).

Pro obrobkové měřicí sondy je program také vybaven funkcí kalibrace sondy. Tato funkce umožňuje zařazení pravidelné kontroly rozměrů a přesnosti dané sondy (Tab. 3.2).



Tab. 3.2: Vybrané obrobkové měřicí funkce

Grafická značka	Název funkce	Popis funkce
	Bod	Funkce, která se zaměřuje na měření jednotlivých definovaných bodů.
	Přímka	Funkce sloužící k měření rovinných přímek. Využívá možnosti definování počtu měřených bodů pro vyšší přesnost.
	Kružnice	Vysoce variabilní funkce schopná měřit vnitřní i vnější kružnice. Možnost volby strategie vhodné pro příslušné měření.
	Rovina (3 body, N bodů v obdélníku, N bodů na kružnici)	Skupiny funkcí určených k měření tvarových vlastností rovin. Je možné využít více strategií a postupů měření.
	2D roh	Funkce, která umožňuje měření 2D rohů, tedy nejruznější hrany dvou na sebe navazujících rovin.
	3D roh	Funkce sloužící k měření vnějších a vnitřních 3D rohů. S vysokou přesností měří například kolmost stýkajících se rovin.
	Žebro/Kapsa	Univerzální funkce, která se věnuje měření jednoduchých nebo tvarových žeborů a kapes.
	Kalibrace sondy	Funkce sloužící ke kalibraci měřicích obrobkových sond. Zaměřuje se kontrolu/úpravu rozměru a polohování dané sondy.

Co se práce s obráběcími nástroji týče, program Productivity+™ disponuje párem k tomu určených funkcí. Přičemž jedna se věnuje nástrojům soustružnickým, druhá naopak frézovacím nástrojům (Tab. 3.3). Dané funkce se ovšem dále větví na další



sekundární funkce. V konečném důsledku lze pomocí toho programu plně využívat portfolio všech funkcí dotykových i bezdotykových nástrojových sond.

Tab. 3.3: Vybrané nástrojové měřicí funkce

Grafická značka	Název funkce	Popis funkce
	Aktualizace nástrojů u soustruhu	Funkce starající se předně o kontrolu a úpravu rozměrů soustružnických nástrojů. Je možné pomocí něj sledovat i opotřebení nástrojů.
	Seřízení nástroje	Soubor funkcí, které se věnuje práci s rotačními frézovacími nástroji. Obsahuje podfunkce, které se dělí v závislosti na nástrojové měřicí sondě.

Jak bylo zmíněno výše speciální funkce se věnují převážně specificky aplikovaným měřicími funkcím (Tab. 3.4). Ovšem nacházejí se zde i funkce, které se starají o práci se souřadnými systémy a nulovými body. Rovněž program Productivity+™ obsahuje pokročilé funkce věnující se kontrole rozměrových, tvarových a polohových tolerancí.

Tab. 3.4: Vybrané speciální funkce

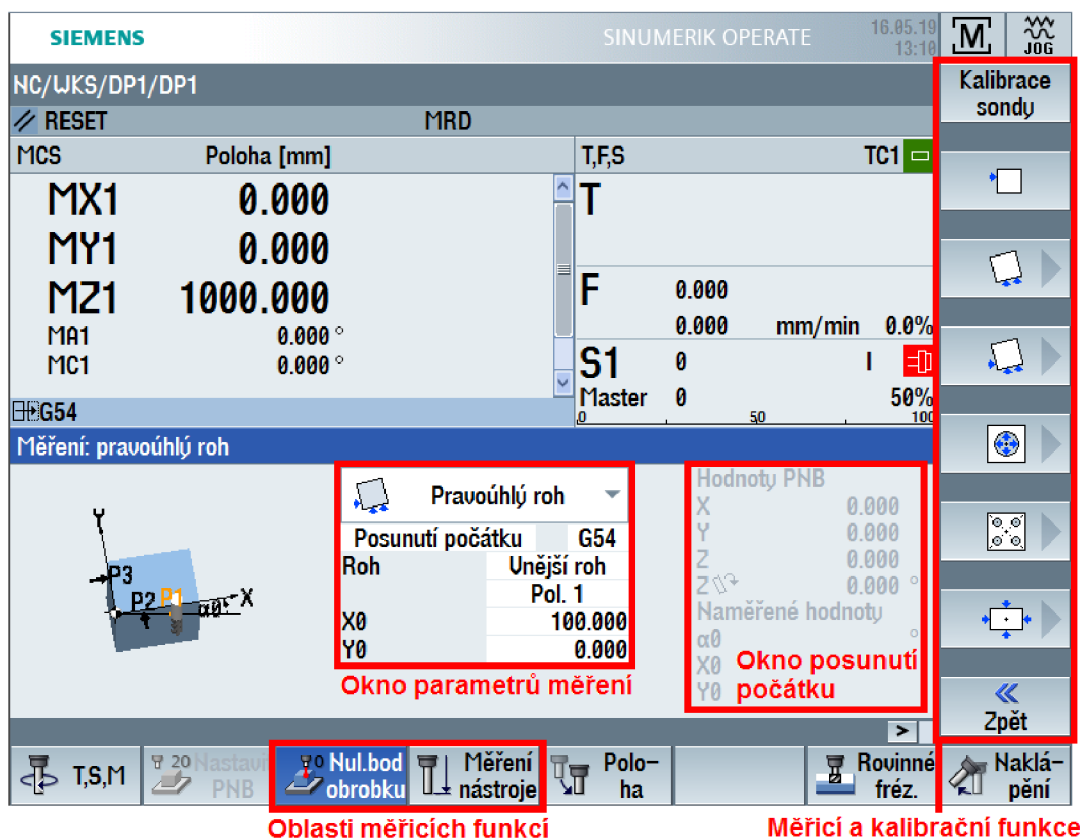
Grafická značka	Název funkce	Popis funkce
	Kužel	Funkce zabývající se měřením vnitřních a vnějších kuželů.
	Koule	Speciální jednoúčelová funkce určená k přesnému měření rozměrů a tvarových tolerancí koulí.
	Kružnice měřená otočením 4 bodů	Speciální funkce využívající pro měření kružnice rotaci 4 předem zvolených bodů. Využíváno pro zajištění vysoké přesnosti.
	Pokročilé měření oblouku	Funkce, která slouží k vysoce přesnému měření vnějších a vnitřních speciálních oblouků.
	Přenos WCS (souřadný systém)	Funkce sloužící k posunování a natačení souřadných bodů obrobků. Rovněž slouží k možnému přemístování nulových bodů.
	Kontrola skutečné polohové tolerance	Funkce zaměřující se na zjišťování přesné polohy prvků, jejichž poloha je přesně definována. Například otvory v kruhovém poli.
	Protokol	Funkce sloužící k vytváření výstupních protokolů měření.

3.2.2 Měření pomocí Sinumerik 840D pl

Dalším softwarem použitelným pro měření na obráběcím CNC stroji je samotný řídicí systém tohoto stroje. Řídicí systém Sinumerik 840D pl disponuje dvojicí měřicích režimů. Měření může probíhat poloautomaticky v režimu JOG nebo plně automaticky v režimu Automatic. Měření v režimu Automatic není standardním prvkem výbavy obsaženým v řídicích systémech rodiny Sinumerik. Je nutné jej spustit pomocí opčních parametrů [38,39].

Oba režimy měření poskytují prakticky totožné funkce. Rozdíl lze ovšem hledat v potřebných režimech stroje. Měření pomocí režimu JOG se provádí v manuálním režimu CNC stroje (Obr. 3.4). Sonda, zde může být použita spínací i nespínací, je polohována ručně pomocí interaktivního ovládacího panelu na stroji. Dostupné měřicí funkce kopírují praktické potřeby operátorů těchto strojů. Lze tedy pomocí měření kompenzovat posunutí či natočení souřadného systému obrábění, měřit správnost rozměrů a tvarů, kontrolovat kruhovitost a pravouhlost čepů a kapes nebo vyhodnocovat přesnost rozmístění tvarových prvků obrobku [39,40].

Druhý, automatický, režim měření je možné plně integrovat do obráběcího NC programu. Je ovšem předem nutné nadefinovat, jak bude s naměřenými hodnotami zacházeno. Řídicí software umožňuje tyto hodnoty směřovat do tří oblastí. Jednak mohou být tato data uložena jako rozměrové informace o obrobku, za druhé mohou sloužit jako informace pro korekci souřadného systému a poslední možností je jejich použití pro úpravu rozměrů a tolerancí obráběcího nástroje [39,40].



Obr. 3.4: Pracovní plocha programu Sinumerik 840D pl (režim JOG)

3.2.3 Měřicí software Form Control V4

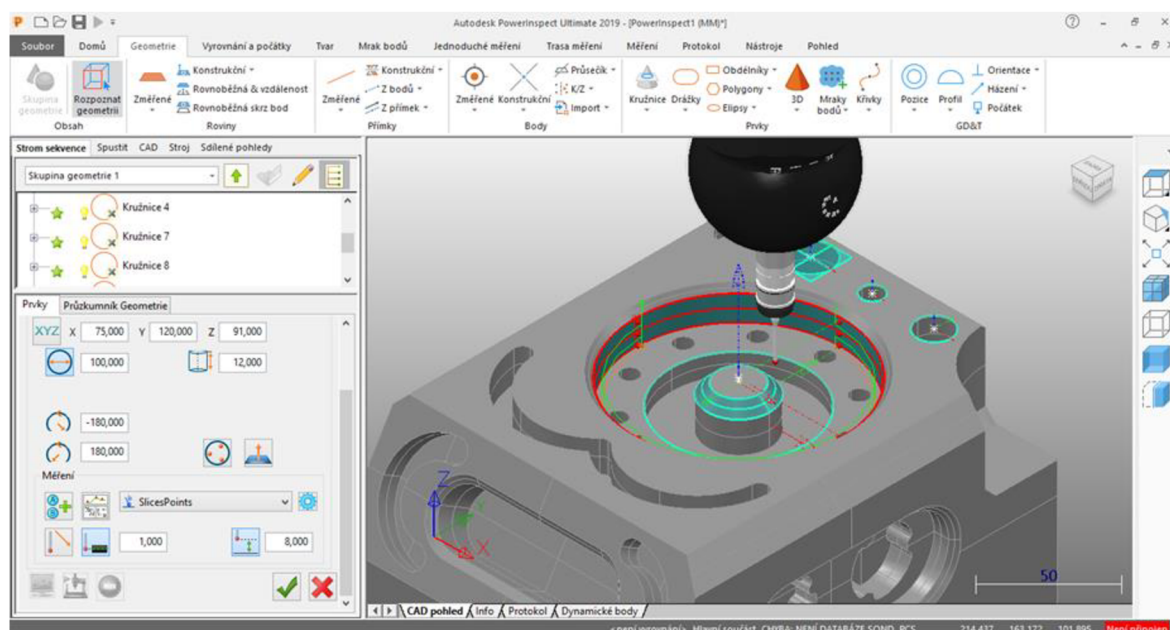
Měřicí software Form Control od společnosti Blum-Novotest je velice obdobný jako Productivity+™. Stejně jako on nabízí možnost interaktivního vytváření měřicích cyklů v PC programu a jeho následnou importaci do řídicího programu obrábění (stroje).

Ostatně obdobným způsobem probíhá i definice strategie měření. I zde je využíváno počítačové myši, při kliknutí na prvek importovaného 3D modelu je možné z dialogového okna vybírat příslušnou měřicí funkci.

Pro přenos měřicího programu do řídicího programu stroje je využíváno funkce ADIF (Automatic Data Interface). Díky tomu a jeho jednoduchosti je software běžně využíván i v dílenském prostředí. Zde mohou být naplno využity jeho měřicí funkce a cykly. Mezi ně se například řadí měření přesnosti tvarových kontur, kruhovitosti a válcovitosti, průměrů, souosostí a dalších geometrických rozměrů. Program je samostatně schopný rozpoznávání polotovarů obrobků a jejich přesného ustavování. Všechny tyto funkce vedou ke zrychlování procesu měření, potažmo celého procesu obrábění. Samozřejmostí je pak možnost vygenerování měřicího protokolu pro jednotlivé elementy obrobku nebo pro obrobek jako celek [41].

3.2.4 Měřicí software PowerInspect

Rodina programů softwarové firmy Autodesk rovněž obsahuje program zaměřující se na měření obrobků přímo v obráběcím stroji. Tento program se jmenuje PowerInspect. Obecně se se tento program zaměřuje spíše na měření pomocí souřadnicových měřicích ramen nebo ke skenování mimo pracovní prostor obráběcího stroje. Avšak edice PowerInspect Ultimate podporuje vytváření měřicích NC cyklů a jejich následnou importaci pomocí postprocesorů do obráběcích programů (Obr. 3.5). Ovšem z důvodu vysoké orientace na mimo strojní měření je automatické pětiosé strojní měření využíváno jen pro orientační zjišťování požadovaných rozměrových informací [42].



Obr. 3.5: Pracovní plocha programu PowerInspect.

Největší výhodou tohoto programu je právě jeho zařazení do rodiny programů společnosti Autodesk. Provázanost těchto programů umožňuje vytvoření 3D návrhu součásti v aplikaci Inventor, následný návrh a simulaci frézování v aplikaci PowerMill, a konečný návrh a simulaci strategie měření v aplikaci PowerInspect.

3.2.5 Měřicí software 3D Form Inspect

Posledním měřicím softwarem je 3D Form Inspect od společnosti m&h Hexagon. Jedná se software vyvinutý primárně pro kontrolu rozměrných lisovacích forem pro

letecký a automobilový průmysl. Stejně jako program Productivity+ se jedná o program jehož výrobcem je firma zabývající se výrobou metrologické techniky.

I zde je tedy možné vytvářet měřicí programy a cykly bez hlubší znalosti problematiky strojního programování. Ty mohou být následně implementovány do obráběcích NC programů. Této možnosti je dosaženo intuitivním ovládním, které umožňuje přímou práci s CAD modely měřených součástí. Srovnatelně jako předchozí měřicí software poskytuje 3D Form Inspect možnost simulace daných cyklů, čímž je předcházeno chybám v programu či případným kolizím. Standardními funkcemi, kterými je program vybaven, jsou například kontrola standardních geometrických tvarů a rozměrů, stanovení úhlové polohy obrobku nebo komparační vyhodnocování tolerancí tvarů a rozměrů [43].

Tento PC software rovněž obsahuje možnost vygenerování měřicího protokolu, a to pro kompletní obrobek nebo taktéž pro jeho jednotlivé prvky. Na jedno upnutí obrobku do obráběcího stroje poskytuje tento program veškerý měřicí servis, který umožňuje zvyšování automatizace a digitalizace celého procesu obrábění.

4 NC PROGRAMOVÁNÍ OPERACÍ MĚŘENÍ PRO CNC FRÉZOVACÍ STROJ

Aplikace strojního měření pomocí obrobkových nebo nástrojových sond do procesů třískové obrábění nebyla nikdy jednodušší. V současnosti se na trhu nachází poměrně velké množství dostupných programů a softwarových aplikací, které umožňují tvorbu a implementaci těchto měřicích NC kódů do řídicích programů obrábění. Hlavním motorem těchto inovací jsou pak myšlenky a prvky Průmyslu 4.0, které jsou tímto způsobem implementovány do výrobního procesu. Právě možnosti, které tyto sondy nabízejí, přispívají k prohlubování automatizace a robotizace výroby. Nemalou měrou také zvyšují kvalitu a produktivitu výroby, přičemž zároveň snižují chybovost obsluhy obráběcích strojů.

Podrobný proces programování měřicích cyklů je zde demonstrován na dvou příkladech. Těmito zvolenými programy jsou software Productivity+™ od společnosti Renishaw s.r.o. a Sinumerik ShopMill vyvinutý společností Siemens s.r.o., který je obsažen v prostředí programu SinuTrain. Výstup tedy tvoří podrobný návod, který má za úkol sloužit jako podklad pro tvorbu komplexních měřicích cyklů v těchto programech. Nechybí ani zhodnocení vhodnosti těchto programů a jejich vzájemné porovnání.

V neposlední řadě je zde možné nalézt ekonomické zhodnocení implementace měřicích sond do výrobního procesu. Toto zhodnocení je prezentováno na případové studii zabývající se aplikací obrobkové měřicí sondy do procesu ustavování a upínání obrobku do obráběcího CNC centra MCV 1210.

4.1 Programování měřicích operací v prostředí Productivity+™

Představení možností programování měřicích operací v prostředí programu Productivity+™ je rozděleno do dvou částí. V první části jsou nastíněny postupy, doporučené kroky tvorby a pravidla pro práci s programem. Dále je zde zmíněno vytváření a větvení funkcí nebo také možnost zapojení logických funkcí do procesu měření.

V druhé části je právě podle tohoto návodu vytvořen měřicí program, který je implementován na navržený testovací obrobek. Tyto navržené měřicí sekvence slouží jako příklad aplikace funkcí a možností programu.

4.1.1 Postup programování v prostředí Productivity+™

Proces programování měřicích operací a cyklů v prostředí programu Productivity+™ je komplexní a intuitivní soubor kroků. Jak již bylo zmíněno výše, program umožňuje buď tvorbu nových měřicích programů nebo editaci těch stávajících. Všechny tyto cykly jsou logicky sestavovány do větších komplexních celků. Sestavování se řídí základními pravidly, která jsou shrnuta v následujících podkapitolách.

4.1.1.1 Import 3D modelu

Možnosti importu předem vytvořeného 3D modelu do pracovního prostoru programu jsou tři. První možností je vložení pomocí dialogového okna při spuštění programu. Zde se program uživatele ptá, zda se chystá vytvářet nový měřicí program nebo zda se bude pouze upravovat ten stávající. V okamžiku, kdy uživatel zvolí možnost vytváření nového měřicího programu, je vyzván k otevření požadovaného 3D modelu. Druhým způsobem použití klasické nabídky **Otevřít...** (popřípadě **Import pevného**

modelu). Poslední možností je takzvané tvrdé přetažení modelu do pracovního prostoru programu. Ve všech zmíněných případech je importovaný 3D model přesně vykreslen do pracovního prostoru programu.

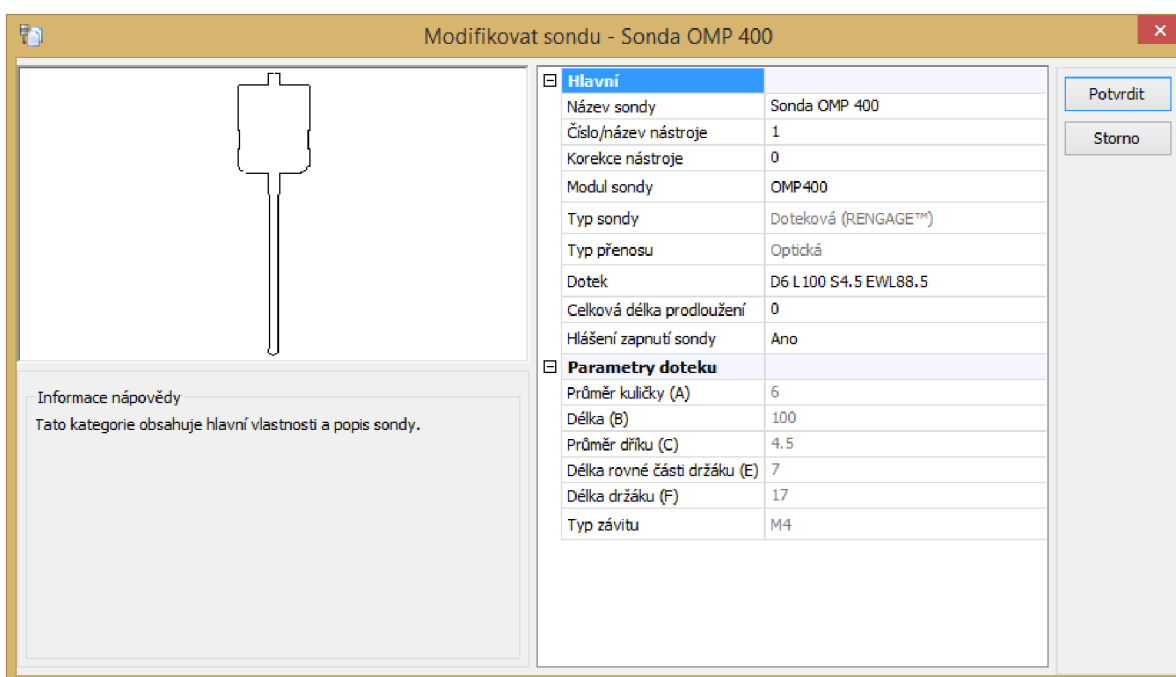
Důležitou fází importace modelu obrobku je určení počátku souřadného systému. Program umožňuje vytvoření množství těchto nulových bodů. Společně s možností stranového naklápění a rotace modelu (funkce **Nástroje pro práci s modelem**) se značně zjednodušuje použití programu na víceosých obráběcích strojích. Právě umístění počátku souřadných systémů (nulových bodů) měření značně ovlivňuje budoucí rychlost a plynulost měření.

4.1.1.2 Vytváření a definování parametrů měřicí sondy

Dalším krokem, který předchází samotnému vytváření měřicích/kontrolních programů, je definování či případná modifikace již stávající měřicí sondy (Obr. 4.1). Program Productivity+™ má ve své databázi všechny dostupné modely obrobkových i nástrojových sond značky Renishaw, proto není problém potřebnou sondu zvolit a nadefinovat její parametry.

Co se zmíněných parametrů týče, software umožňuje zvolení jakéhokoliv dostupného doteku či dřívku tohoto doteku, přičemž do příslušných polí dialogového okna samostatně nadefinuje parametry zvoleného příslušenství k dané sondě.

Při této práci se sondami je nutné přesně definovat číslo/název nástroje, a to z toho důvodu, aby již při práci na obráběcím CNC stroji mohla být bezpečně daná sonda zavolána ze zásobníku nástrojů. V opačném případě může dojít chybnému zavolání jiného nástroje, který může obrobek nenávratně poničit.



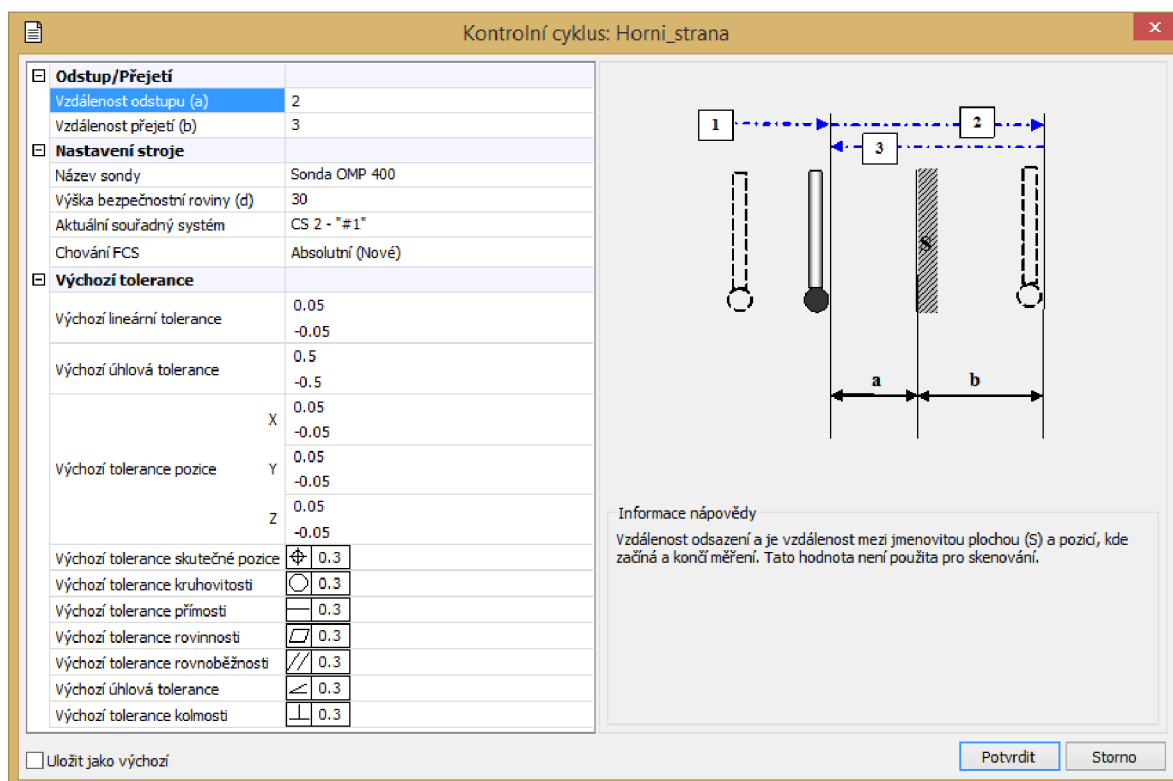
Obr. 4.1: Dialogové okno – Modifikace sondy.

U nově vytvořené dotekové obrobkové sondy by vždy měla při uvedení do výrobního procesu následovat její kalibrace. Program pro tento účel obsahuje samostatnou speciální funkci pojmenovanou **Kalibrace sondy**. Pro použití této funkce je ovšem nutné mít v pracovním prostoru stroje umístěný takzvaný kalibrační artefakt. Nejčastěji

je používán kulový kalibrační artefakt. Díky němu se sonda při použití správného kalibračního cyklu dokáže sama zkalibrovat a připravit se na následující měření.

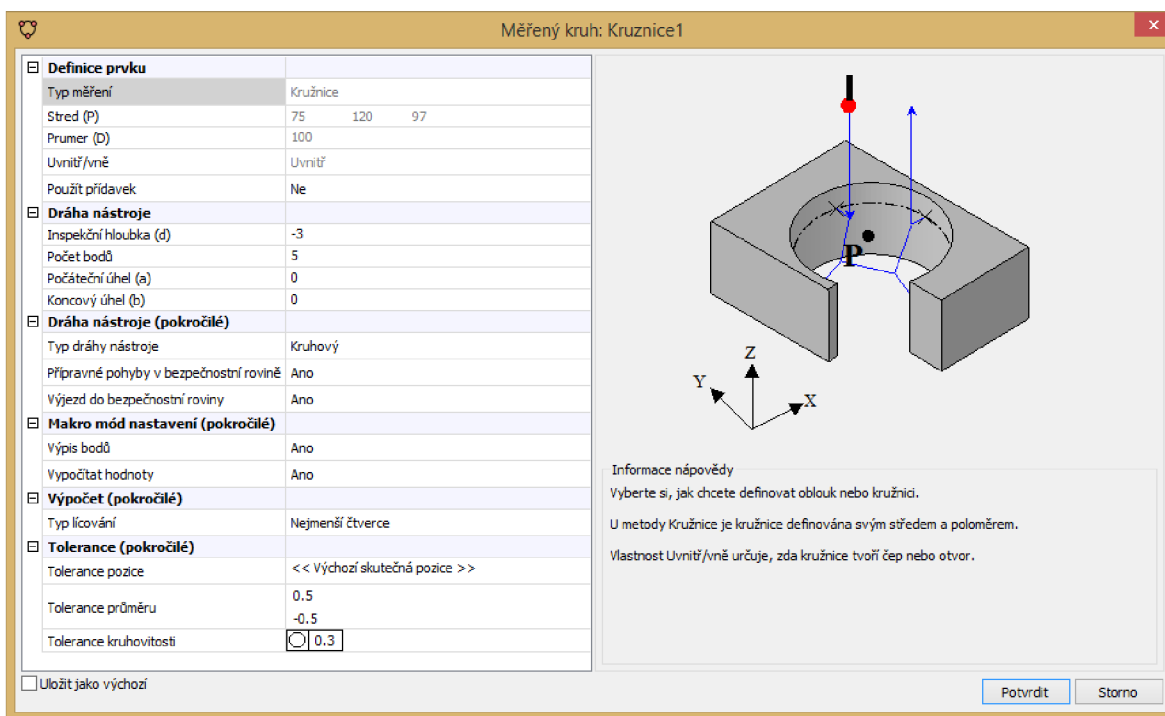
4.1.1.3 Vytváření měřicích/kontrolních cyklů

Samotný strom cyklů musí být vždy započat **Kontrolním cyklem** (v programu též označován jako **Inspekční cyklus**). Tento kontrolní cyklus (Obr. 4.2) je řídicím prvkem všech následujících měřicích cyklů. Pomocí jeho dialogového okna jsou nastavovány parametry potřebné pro správné fungování měřicích cyklů. Mezi tyto parametry se například řadí výběr výchozího souřadného systému měření, stanovení bezpečnostních odstupů a rovin či nastavení výchozích tolerancí.



Obr. 4.2: Dialogové okno – Kontrolní cyklus (funkce Inspekční cyklus).

Dále je už možné vkládat jednotlivé měřicí cykly (Obr. 4.3). Nejzákladnějším způsobem vkládání měřicích cyklů je jejich přiřazení k tvarovému prvku pomocí počítačové myši. Avšak jak bylo zmíněno výše, mohou být tyto cykly implementovány i dalšími dvěma způsoby. I zde program s uživatelem komunikuje, přičemž opět pomocí dialogového okna požaduje po uživateli upřesnění parametrů měření. Tyto parametry se liší v závislosti na použité měřicí funkci. Vesměs se ale jedná o parametry vztahující se k definici daného měřeného prvku obrobku, dráhy, kterou se sonda v průběhu měření pohybuje nebo k aplikovanému způsobu snímání a určování tolerancí rozměrů.

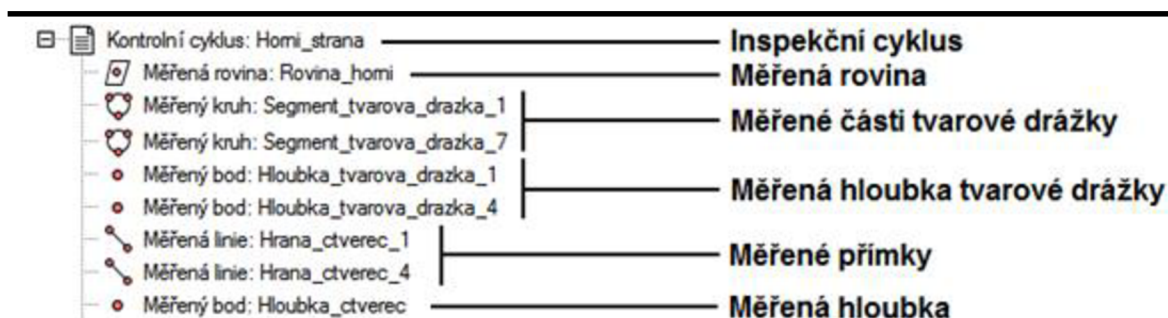


Obr. 4.3: Dialogové okno – Měřený kruh (funkce Měřená kružnice)

Použité měřicí cykly jsou řazeny za sebou v pořadí (Obr. 4.4), jaké si uživatel sám navolí, a tím tak vytvářejí strukturovaný strom těchto cyklů a funkcí. Další velice praktickou funkcí (funkce **Když...Pak**) je možnost vytváření podmínek a podmíněných kroků v procesu měření. Tyto funkce jsou nejčastěji využívány v oblastech mezioperačního měření, kdy pomocí nich dochází k rozhodnutí, zda byl daný prvek vyroben v souladu s předepsanými tvarovými a rozměrovými tolerancemi.

Právě při použití programu při mezioperačním měření je vhodné používat funkce určené k měření a kontrole obráběcích nástrojů, a to ať už se jedná o frézování nebo soustružnické nástroje. Pro oba případy se v programu nacházejí funkce (funkce **Aktualizace nástrojů u soustruhu** a **Seřízení nástroje**), které je možné snadným způsobem implementovat do stromu měřicích funkcí, a zajistit, že veškeré nástroje vstupující do procesu obrábění odpovídají jejich předepsaným parametrům (např. profil nástroje, opotřebení nástroje nebo jeho poškození).

Zde je rovněž nutné využívat funkci **G-kód blok**, která umožňuje vkládání nebo vytváření bloků G-kódu. Těmito bloky se rozumí například naprogramované cykly obrábění, úpravy polohy pracovního stolu nebo výměna nástroje. Právě díky tomuto importu již hotových částí řídicího programu obrábění do programu Productivity+™ vznikají kompletní NC programy, které je možné okamžitě zařazovat do výrobního procesu.



Obr. 4.4: Příklad tvorby stromu měřicích funkcí.

4.1.1.4 Vytváření výstupních měřicích protokolů

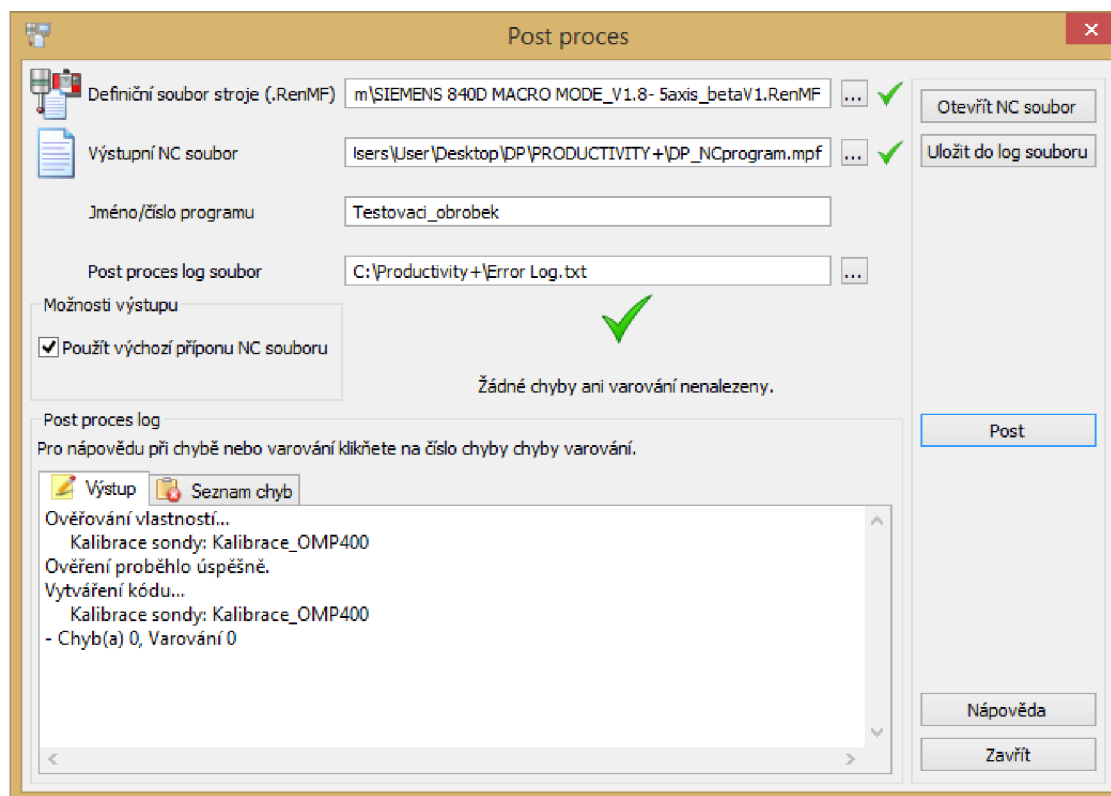
Vytváření výstupních protokolů měření je další krokem v procesu programování měřicích operací. Pro jejich aplikaci do stromu měřicích funkcí jsou primárně určeny dvě funkce, jedná se o funkci **Protokol** a **Uložení protokolu**. Při vložení se program uživatele zeptá, které měřicí cykly si přeje v protokolu zaznamenat, činí tak opět pomocí dialogového okna. Zde si zároveň může uživatel nastavit vzhled a obsah daného měřicího protokolu. Jeho následné uložení je iniciováno pomocí zmíněné funkce Uložení protokolu. I zde uživatel v dialogovém okně nastavuje parametry tohoto procesu, zejména pak formát a místo uložení.

4.1.1.5 Postprocessing

Posledním krokem při vytváření měřicích programů v prostředí softwaru Productivity+™ je takzvaný postprocessing (funkce **Post Proces**). Jedná se o proces, kdy jsou naprogramované měřicí operace převedeny do G-kódu obrábění. Program s uživatelem opět komunikuje pomocí dialogového okna (Obr. 4.5) a požaduje vložení určitých parametrů tak, aby byl vygenerovaný G-kód korektní.

Nejdůležitějším vstupním kritériem je **Definiční soubor stroje (Postprocessor)**. Právě tento parametr určuje výslednou podobu výstupního kódu. Při vkládání tohoto postprocessoru je nutné, aby se jednalo o aktuální verzi a zároveň aby tato verze byla kompatibilní s řídicím systémem obráběcího stroje, na kterém bude měření následně prováděno. Firma Renishaw s.r.o. dodává tyto postprocessorsy pro naprostou většinu těchto řídicích systémů.

Přenos výsledného NC programu do řídicího počítače příslušného obráběcího stroje je následně možné uskutečnit jak pomocí USB paměťového disku nebo pak pomocí interní firemní sítě, je-li na ni daný obráběcí stroj připojen.



Obr. 4.5: Dialogové okno – Post procesor (funkce Post Proces)

4.1.2 Aplikace měřicích operací na testovací obrobek v prostředí Productivity+™

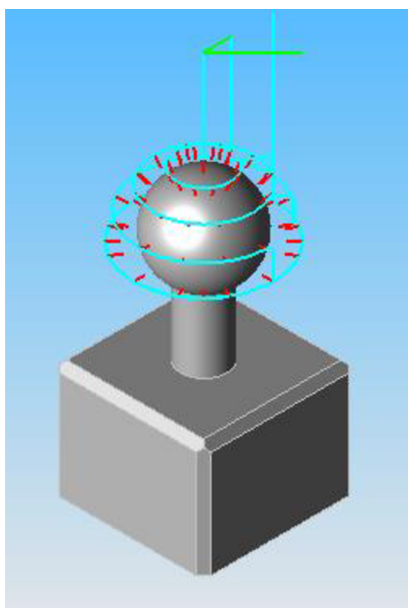
Pro navržený testovací obrobek je nutné vytvořit pětici samostatných komplexních měřicích cyklů. Jelikož je jedná o poměrně tvarově složitý obrobek, je celé měření rozděleno do bloků, kdy se každý tento blok zabývá jeho jednou stranou. To znamená, že pro každou stranu obrobku je vytvořen nový strom měřicích cyklů. Tato potřeba vznikla právě z nutnosti natáčení a naklápění obrobku během měření. Kvůli tomu je ovšem také nutné pro každý blok vytvořit nový kontrolní cyklus, měřicí cykly a konečný výstupní protokol.

4.1.2.1 Měřicí operace před zahájením obráběcího procesu

I přes nutnost stranového členění měřicích programů, existují některé operace, které je potřeba vykonat ještě před samotným spuštěním obráběcího procesu. Přesněji se jedná o kalibraci měřicí sondy a její následné použití při ustavování obrobku. Celé problematice upnutí a ustavování obrobku se věnuje kapitola Ekonomického zhodnocení.

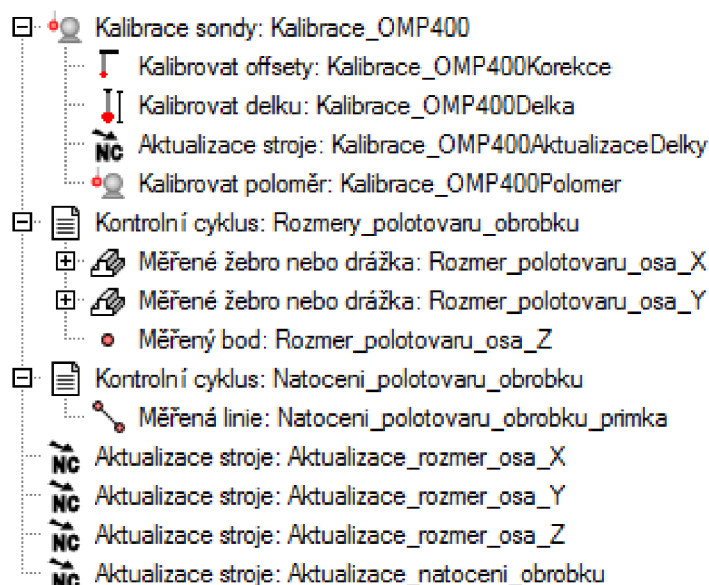
Měřicí operace, které je nutné vykonat před zahájením procesu obrábění jsou popsány v následujících bodech:

1. Volba měřicí sondy a její následné zavolání ze zásobníku nástrojů – Nastavení parametrů sondy v dialogovém okně (funkce **Databáze sond**), zvolení správného umístění sondy v zásobníku nástrojů.
2. Kalibrace sondy pomocí kulového artefaktu – Využití standardní funkce **Kalibrace sondy**, kalibrováno pomocí kulového kalibračního artefaktu o průměru 25 mm (Obr. 4.6).



Obr. 4.6: Vizualizace drah kalibrace sondy pomocí kulového artefaktu.

3. Ustavení polotovaru obrobku a určení nulového bodu – Nejdříve za využití **Kontrolního cyklu: Rozměry_polotovaru_obrobku** zjištěny přesné rozměry polotovaru obrobku (funkce **Měřené žebro/kapsa** a **Měřený bod**). Následně pomocí **Kontrolního cyklu: Natočení_polotovaru_obrobku** a funkce **Měřená přímka** zjištěno úhlové natočení polotovaru testovacího obrobku.
4. Aktualizace parametrů polotovaru obrobku a určení jeho nulového bodu – Pomocí funkce **Aktualizace stroje** provedeno uložení přesných rozměrů polotovaru do paměti obráběcího stroje. Dále pak aktualizace souřadného systému a nulového bodu obrábění (Obr. 4.7).



Obr. 4.7: Strom měřicích operací aplikovaných před zahájením třískového obrábění.

4.1.2.2 Měřicí operace během obráběcího procesu

Jak již bylo zmíněno výše, tak obráběcí i měřicí proces testovacího obrobku je rozdělen do pětice bloků. Každý tento blok je přiřazen jedné straně tohoto navrženého obrobku. Při použití mezioperačního měření je nutné vytvořit prostor pro vložení G-kódu operací spojených s procesem obrábění. V tomto případě se jedná o výměnu nástrojů a samotné hrubovací a dokončovací operace třískového obrábění. Rovněž je využíváno dalších funkcí obsažených v programu Productivity+™, zejména pak bezdotykové měření a kontrola obráběcích nástrojů vstupujících do procesu obrábění či výstavba logických podmínek měření.

V případě aplikace mezioperačního měření na navržený testovací obrobek bylo postupováno v následujících krocích:

1. Kalibrace sondy pomocí kulového artefaktu – Využití standardní funkce **Kalibrace sondy**, kalibrováno pomocí kulového kalibračního artefaktu o průměru 25 mm.
2. Výměna obráběcího nástroje – Pomocí funkce **G-kód blok** vytvořeno místo pro vložení G-kódů řídicího výměny měřicí sondy za obráběcí nástroj.
3. Kontrola obráběcího nástroje – Kontrola stavu a parametrů obráběcího nástroje vstupujícího do procesu obrábění (funkce **Seřízení nástroje**). Využíváno bezdotykové (laserové) nástrojové sondy Renishaw NC 4.
4. Třískové obrábění – Opět pomocí integrované funkce **G-kód blok** vytvořen prostor pro import G-kódu obrábění. Tento blok zakončen opětovnou výměnou obráběcího nástroje za měřicí dotykovou sondu.
5. Měření tvarových prvků – Aplikace měřených funkcí na tvarové a rozměrové prvky vytvořené během hrubovacích operací, vždy daným obráběcím nástrojem. Pomocí funkce Protokol uloženy naměřené hodnoty pro budoucí logické rozhodování.
6. Logické rozhodování – V závislosti na změřených hodnotách rozhodnuto, zda vyhrubované tvarové a rozměrové prvky odpovídají předepsaným tolerancím či je nutné jejich opětovné obrobení (funkce **Když...Pak**). V případě korektního výsledku měření přesun k dokončovacím operacím obrábění.



Obr. 4.8: Strom měřicích operací aplikovaných v průběhu třískového obrábění.

Pro názornost postupu aplikace měřicích operací během obráběcího procesu je opět prezentováno jen měření horní strany navrženého testovacího obrobku. Výše popsany sled operací se vztahuje pouze k jednomu obráběcímu nástroji. Tento postup se vždy, s výjimkou kalibrace měřicí dotykové sondy, opakuje pro každý nově vstupující obráběcí nástroj. Kompletní strom mezioperačního měření pro horní stranu testovacího obrobku lze vidět na Obr. 4.8.

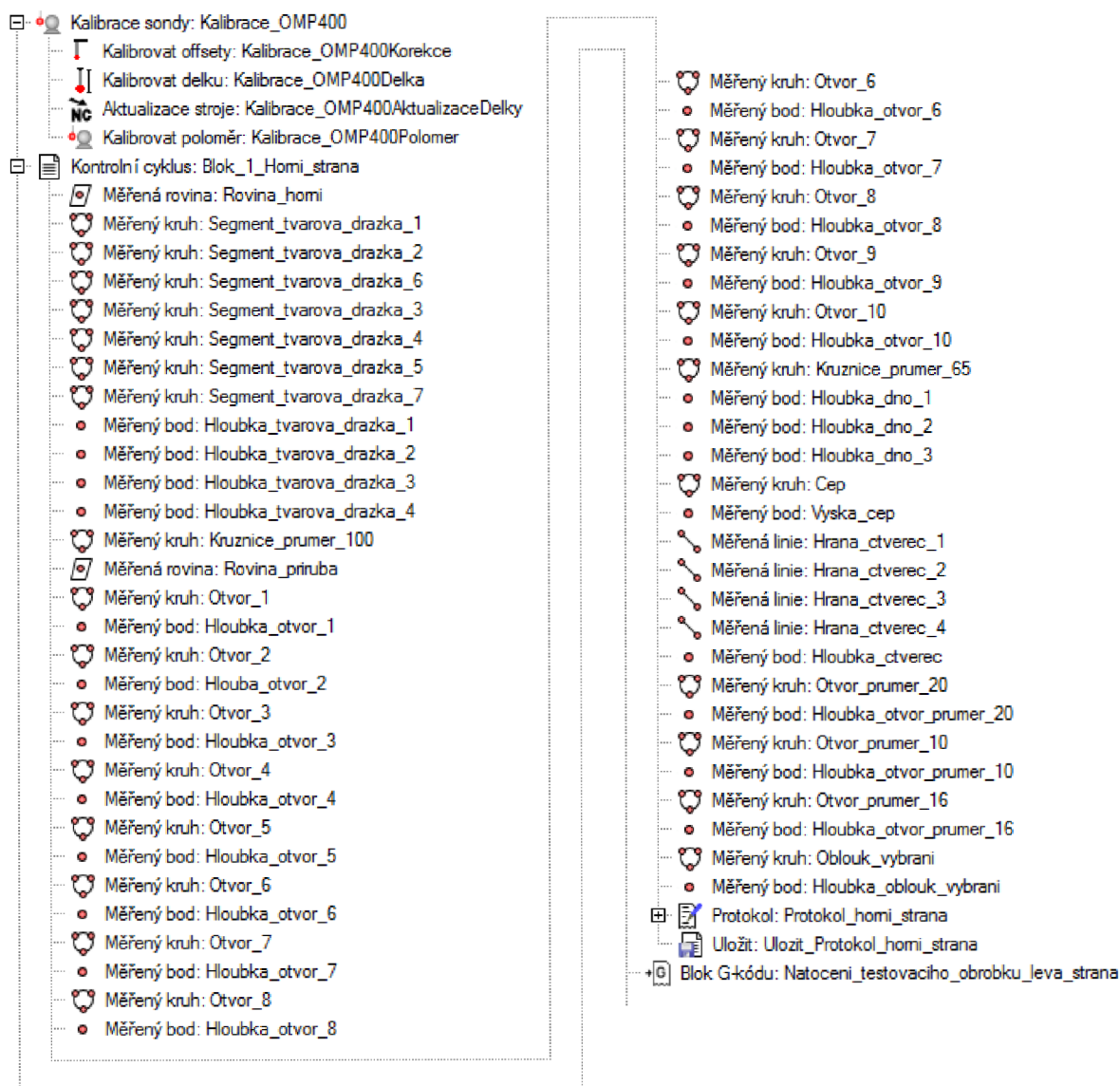
4.1.2.3 Měřicí operace po ukončení obráběcího procesu

Po zakončení celého procesu obrábění se dostává na scénu finální strojní měření celého testovacího obrobku. I zde je kvůli nutnosti natáčení obrobku v obráběcím CNC centru MCV 1210 měřicí program rozdělen do pěti bloků. Tomuto natáčení by bylo možné se vyhnout použitím sondy s křížovým dotykem. Ovšem z důvodu plného využití možností obráběcího CNC centra tak nebylo učiněno.

Finální vyhodnocení daného bloku se vždy skládá z měřicích operací aplikovaných na tvarové a rozměrové prvky testovacího obrobku a z vygenerovaného protokolu měření pro příslušný blok. Před samotným zahájením finálního měřicího procesu dojde k opětovné kalibraci měřicí obrobkové sondy, a to z důvodu eliminace možných nepřesností vzniklých při uložení v zásobníku nástrojů obráběcího centra.

Finální měřicí operace, které jsou prováděny po dokončení celého procesu třískového obrábění, jsou opět popsány v následujících bodech:

1. Volba měřicí sondy a její následné zavolání ze zásobníku nástrojů – Nastavení parametrů sondy v dialogovém okně (funkce **Databáze sond**), zvolení správného umístění sondy v zásobníku nástrojů.
2. Kalibrace sondy pomocí kulového artefaktu – Využití standardní funkce **Kalibrace sondy**, kalibrováno pomocí standardizovaného kulového kalibračního artefaktu o průměru 25 mm.
3. Měření tvarových prvků – Aplikace měřených funkcí na tvarové a rozměrové prvky testovacího obrobku.



Obr. 4.9: Strom měřicích operací finálního měření horní strany testovacího obrobku.

4. Vygenerování protokolu měření – Uložení naměřených dat do paměti obráběcího stroje a následné vygenerování protokolu měření (funkce **Protokol** a **Uložení protokolu**).

5. Natočení testovacího obrobku – Vložení G-kódu ovládacího programu obráběcího stroje, který zapříčiní natočení a naklonění pracovního stolu stroje do požadované pozice. Při programování použita k tomu určená funkce **G-kód blok**.

Poslední tři body této bodové posloupnosti se opakují u všech pěti měřicích bloků. Body, ve kterých jsou voleny parametry měřicí sondy a její následná kalibrace, se nacházejí pouze na počátku finálního měřicího programu.

Jako příklad je vyobrazena část stromu měřicích operací finálního měření navrženého testovacího obrobku. Tato zvolená část (Obr. 4.9) obsahuje operace kalibrace měřicí sondy a následně měřicí operace aplikované na horní stranu testovacího obrobku. Kompletní verzi tohoto měřicího programu lze nalézt mezi přílohami práce (Příloha 3).

4.2 Programování měřicích operací v prostředí Sinumerik ShopMill

I u programu Sinumerik ShopMill je programování měřicích operací rozděleno do dvou částí, stejně jako tomu je u předchozího programu. První část se tedy věnuje představení měřicích možností samotného programu a nastínění, jakým stylem musí být při tvorbě měřicích programů postupováno. A v neposlední řadě jsou vyslovena pravidla a praktická doporučení pro tvorbu těchto měřicích sekvencí.

Ve druhé části je tentokrát vytvořen kompletní NC program obrábění testovacího obrobku s implementovanými měřicími cykly. Tyto naprogramované měřicí cykly slouží jako vzorové příklady aplikace procesů strojního měření v prostředí programu Sinumerik ShopMill.

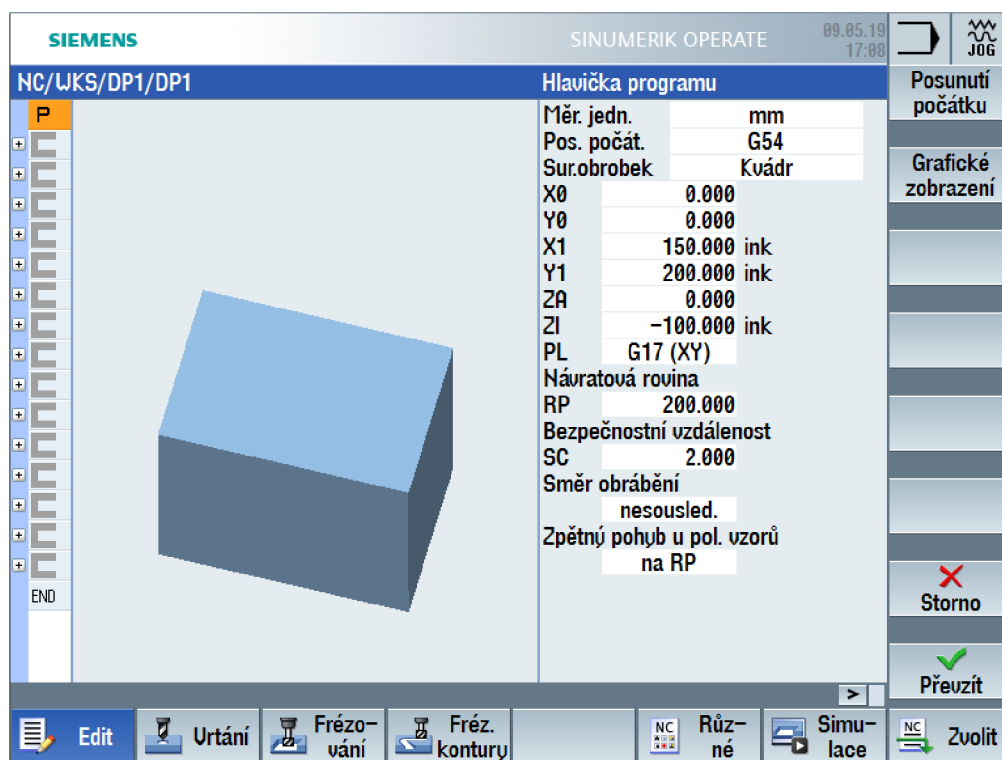
4.2.1 Postup programování v prostředí Sinumerik ShopMill

Proces programování v prostředí Sinumerik ShopMill je značně odlišný od toho v programu Productivity+™. Hlavní důvodem tohoto rozdílu je fakt, že aplikace ShopMill je primárně vytvořena pro dílenské použití. Pro potřeby vytvoření souboru měřicích operací bylo využito prostředí programu Sinumerik SinuTrain. Tento program představuje plnohodnotnou počítačovou verzi řídicího CNC systému Sinumerik od společnosti Siemens s.r.o. Program je vybaven možností vytvoření virtuálního CNC obráběcího stroje, a to včetně plně funkčního řídicího panelu obsluhy. Rozšířená verze tohoto programu může posloužit jako nástroj pro vytváření kompletních NC kódů obrábění, které mohou být následně přeneseny do obráběcího stroje.

4.2.1.1 Tvorba 3D modelu

Již první krok tvorby měřicích cyklů se od předchozího programu značně liší. Jelikož jsou tyto měřicí cykly a funkce programovány v dílensky orientovaném programu Sinumerik ShopMill, je nutné si samotný 3D model vytvořit přímo v řídicím systému obráběcího stroje nebo v prostředí programu SinuTrain. Program je v tomto ohledu poměrně intuitivní a uživatele při tvorbě polotovaru a měřicích cyklů po krocích navádí (Obr. 4.10). Všechny prováděné změny lze navíc pozorovat pomocí **Grafického zobrazení**.

3D model je tedy v první fázi prezentován jako model polotovaru obrobku, následně pak postupně obráběným modelem součásti. Právě na tento model jsou aplikovány jednotlivé měřicí funkce, které mohou sloužit jak k mezioperačnímu měření nebo až k měření po ukončení procesu obrábění. Na zmíněný polotovar obrobku je možné aplikovat funkce sloužící k jeho přesnému ustavení a následnému definování nulového bodu.



Obr. 4.10: Dialogové okno – Tvorba polotovaru obrobku.

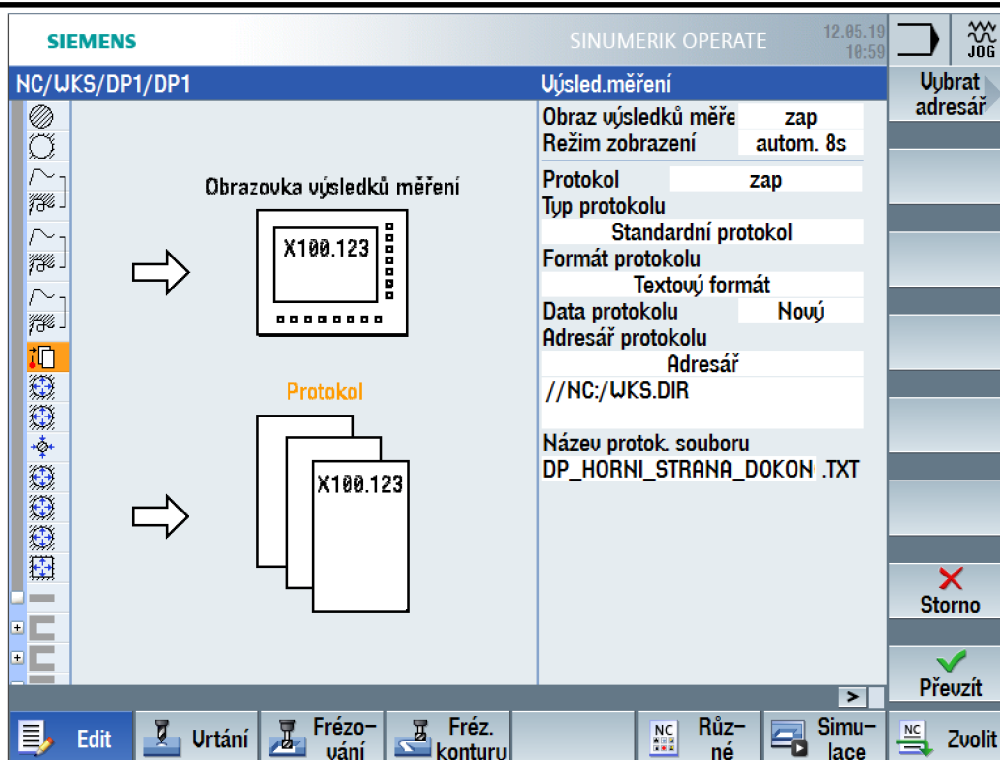
4.2.1.2 Vytváření obrazu měřicí sondy

V programu Sinumerik ShopMill je každá měřicí sonda chápána jako další z řady obráběcích nástrojů. Stejně tomu je i u řídicích systémů jiných výrobců. Pro práci s obráběcími nástroji, potažmo s měřicími sondami, se v programu nachází speciální oblast funkcí nesoucí název **Seznam nástrojů**. Zde je možné vkládat nové obráběcí nástroje, upravovat jejich parametry (např. délka a průměr nástroje, počet břitů, umístění v zásobníku nástrojů atd.) nebo přiřazovat obráběcí režimy.

Měřicí obrobkové sondy se řadí do speciálních nástrojů. Při vytváření jejich obrazu v řídicím systému obráběcího stroje je možné volit mezi více druhy těchto sond. Příslušné dialogové okno nabízí výběr z mnoha druhů dotyku sondy, přičemž vytvoření dané měřicí sondy je proces poměrně rychlý a jednoduchý.

4.2.1.3 Definice výstupního protokolu

Opravdu prvním krokem samotného procesu měření je vytvoření měřicího protokolu, ten v programu nese název **Výsledky měření** (Obr. 4.11). Tato funkce, která by měla vždy předcházet všem aplikovaným měřicím operacím, nabízí dvě možnosti zobrazení naměřených dat.



Obr. 4.11: Dialogové okno – Výsledky měření.

Jako první lze v programu zobrazit takzvanou **Obrazovku výsledků měření**. Jedná se o programové okno, kde je vyobrazen výčet právě změřených prvků. Tato funkce nachází hlavní uplatnění právě v dílenském prostředí, kde si obsluha stroje může rychle a bezproblémově zobrazit aktuálně změřené hodnoty.

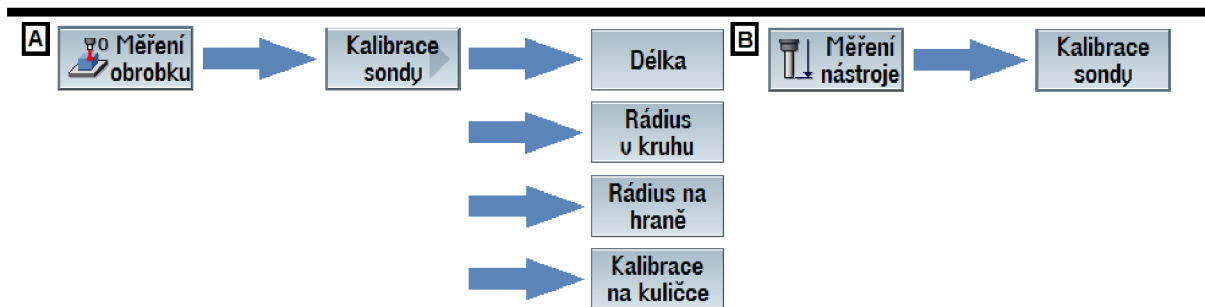
Druhým možným výstupem této funkce je pak klasický protokol měření. Ten je možné vygenerovat ve dvou formátech, textovém a tabulkovém. I zde program s uživatelem komunikuje a postupně po něm požaduje vyplnění daného dialogového okna s upřesňujícími parametry. Tento způsob zobrazení výsledků měření se spíše hodí pro finální měření kompletně opracovaného obrobku.

4.2.1.4 Kalibrace měřicích sondy

Velice důležitým prvkem strojního měření pomocí programu Sinumerik ShopMill je kalibrace měřicích sondy. Tento program nabízí možnost kalibrovat jak měřicí obrobkové sondy, tak i měřicí nástrojové sondy (Obr. 4.12). Zatímco kalibrace měřicích obrobkových sondy je obsažena v oblasti funkcí **Měření obrobku**, tak funkce pro kalibraci nástrojových sond se ukrývá v oblasti funkcí **Měření nástroje**.

Možností kalibrace obrobkových sond je v programu více, přesně se jedná o čtyři kalibrační funkce. Tyto jednotlivé funkce se od sebe liší převážně v závislosti na tvaru použitého kalibračního artefaktu. V programu by tedy měla být použita taková kalibrační funkce, aby odpovídala příslušnému kalibračnímu artefaktu umístěnému v pracovním prostoru stroje. Kalibrace by měla předcházet každému měřicímu bloku.

Pro kalibraci nástrojové sondy je opět nutné využít příslušný nástroj. Tentokrát ke kalibraci nelze využít tvarový artefakt, nýbrž je nutné tento úkon provést prostřednictvím speciálního nástroje. Těmito speciálními nástroji se například rozumí úchylkoměr, obráběcí nástroj s přesně definovanými rozměry nebo je možné využít i obrobkovou měřicí sondu. Dobře kalibrovaná nástrojová sonda následně slouží pro měření obráběcích nástrojů vstupujících do procesu obrábění.

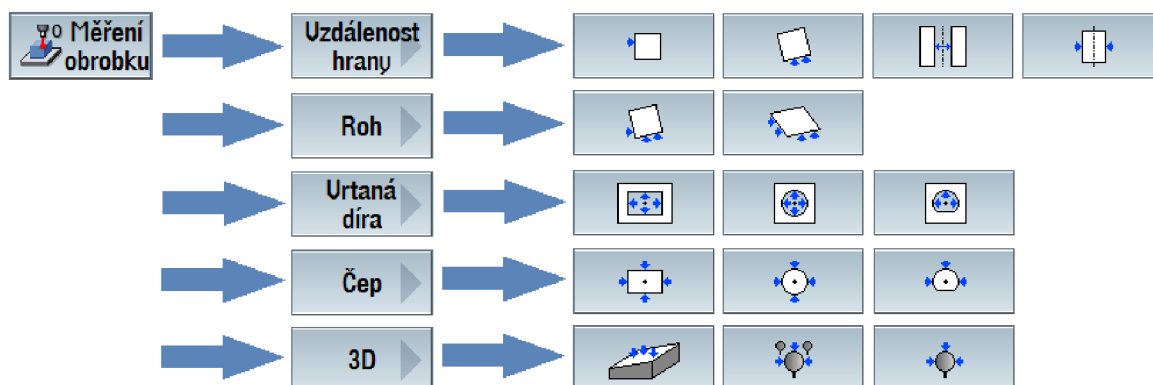


Obr. 4.12: Schéma postupu kalibrace sondy (A – Kalibrace obrobkové sondy, B – Kalibrace nástrojové sondy).

4.2.1.5 Aplikace měřicích cyklů a funkcí

Posledním krokem tvorby měřicích cyklů a funkcí v programu Sinumerik ShopMill je jejich aplikace na tvarové a rozměrové prvky obrobku. Tato aplikace je velice podobná jako aplikace Konstruovaných funkcí v programu Productivity+™. I zde jsou příslušné měřicí funkce přiřazovány k jednotlivým prvkům pomocí dialogového okna. Program s uživatelem komunikuje, přičemž dochází k postupnému zadávání řídicích parametrů měření. Pověštinou se jedná o parametry zaměřující se například na polohu počátku měření, jeho strategii nebo na velikost bezpečnostních odstupů v průběhu měření.

V programu se nachází relativně velké množství měřicích funkcí (Obr. 4.13), které by dle výrobce měly pokrýt veškeré myslitelné tvarové a rozměrové prvky. Tyto funkce se nacházejí v oblasti programu nesoucí název **Měření obrobku**. Zde se tyto funkce dále větví v závislosti na tvaru prvku, k jehož měření slouží.



Obr. 4.13: Schéma výběru měřicí funkce.

4.2.2 Aplikace měřicích operací na testovací obrobek v prostředí Sinumerik ShopMill

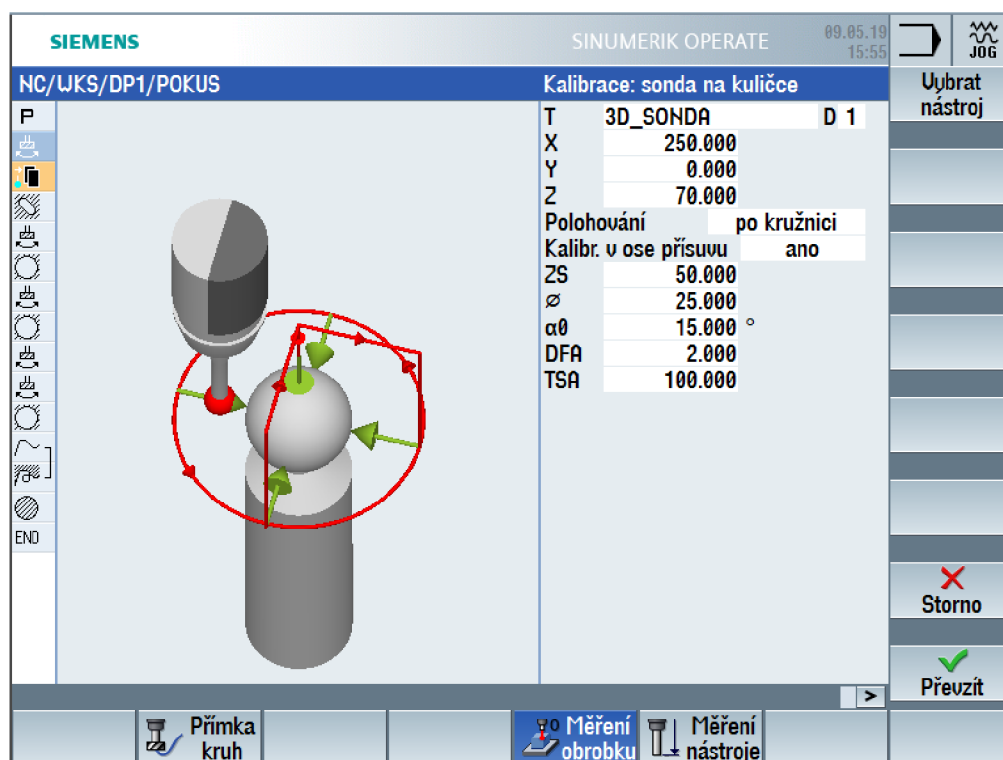
Pro aplikaci měřicích operací na navržený testovací obrobek v prostředí programu Sinumerik ShopMill je nutné naprogramovat kompletní proces výroby na obráběcím CNC stroji MCV 1210. Do tohoto programu obrábění jsou následně implementovány měřicí cykly. Program je opět rozdělen do jednotlivých bloků v závislosti na potřebě natáčení obrobku v průběhu procesu obrábění a měření. Rotace a naklápění pomocí pracovního stolu stroje jsou rovněž obsaženy v programu.

4.2.2.1 Měřicí operace před zahájením obráběcího procesu

Naprogramované měřicí operace, které je nutné vykonat před zahájením procesu, jsou prakticky totožné jako u programu Productivity+™. Rovněž se v zásadě jedná o kalibraci měřicí sondy a její následné použití při ustavování obrobku. Ovšem zde v programu Sinumerik ShopMill jsou tyto operace doplněny o další operace, bez kterých by měření nefungovalo korektně (Vytvoření obrazu měřicí obrobkové sondy, Definice výstupního protokolu).

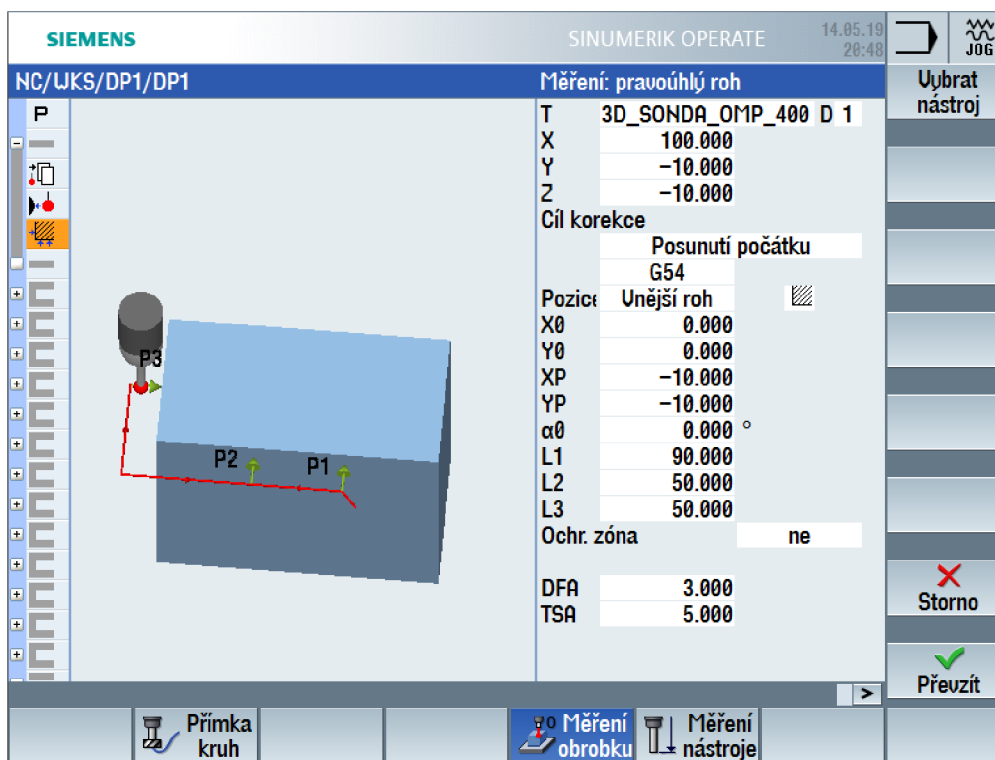
Komplexní postup, podle kterého jsou aplikovány měřicí operace, je popsán v následujících bodech:

1. Vytvoření polotovaru obrobku – V dialogovém okně **Hlavička programu** vytvořen obraz polotovaru navrženého testovacího obrobku.
2. Vytvoření obrazu měřicí obrobkové sondy – Vytvoření obrazu měřicí obrobkové sondy po vzoru Renishaw OMP 400 (oblast funkcí **Seznam nástrojů**) a nastavení jejích parametrů.
3. Definice výstupního protokolu – Pomocí funkce **Výsledky měření** nadefinován styl, oblast a způsob zaznamenávání naměřených dat.
4. Kalibrace sondy pomocí kulového artefaktu – Využitím integrované funkce kalibrace obrobkové sondy (funkce **Kalibrace na kuličce**). Pro kalibraci využít standardizovaný 25mm kulový kalibrační artefakt. V operaci obsaženo i zavolání obrobkové sondy ze zásobníku nástrojů (Obr. 4.14).



Obr. 4.14: Dialogové okno – Kalibrace měřicí sondy (funkce **Kalibrace na kuličce**).

5. Měření ustavení obrobku – Aplikace měřicí funkce **Měření: Pravoúhlý roh** za účelem zjištění přesné polohy polotovaru obrobku (Obr. 4.15). V případě potřeby automatické natočení a posunutí nulového bodu obrábění.



Obr. 4.15: Dialogové okno – Ustavení polotovaru obrobku (funkce **Měření: Pravouhlý roh**).

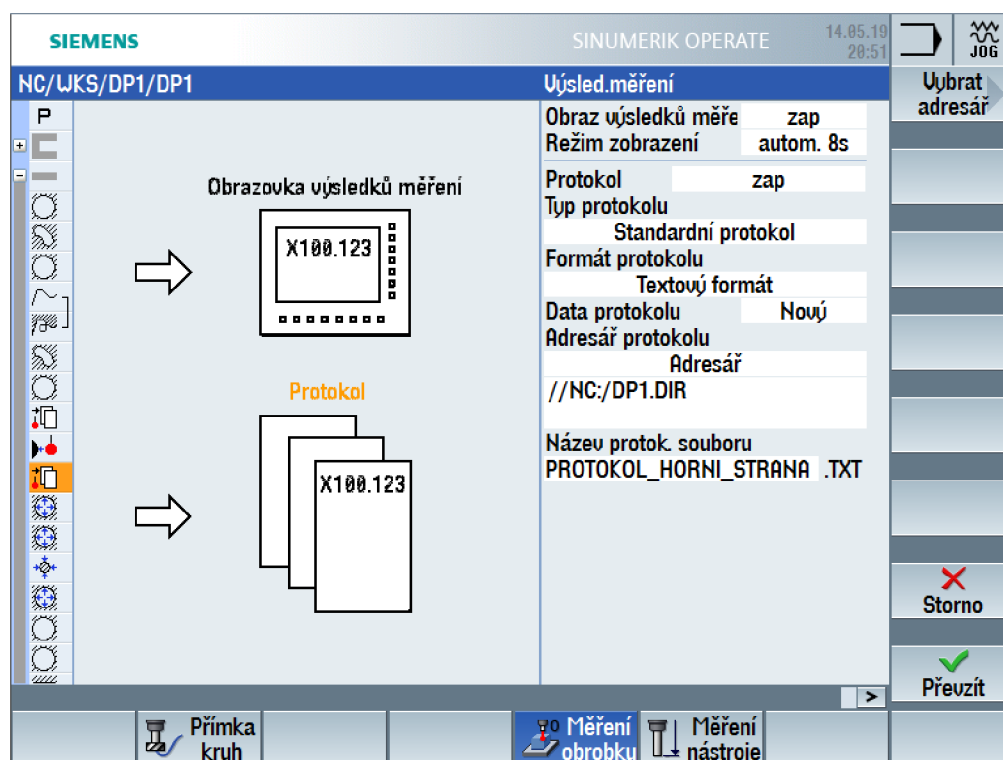
4.2.2.1 Měřicí operace během obráběcího procesu

Stejně jako tomu je v předchozích kapitolách, i zde je obráběcí a měřicí proces rozdělen do pěti bloků, a to v návaznosti na potřebu natáčení a naklápění obrobku v průběhu těchto procesů. Každý blok skládající se z hrubovacích, měřicích a dokončovacích operací je vždy přiřazen k příslušné straně navrženého testovacího obrobku.

Pro aplikaci mezioperačního měření je nutné vytvořit nový měřicí protokol a více než vhodná je také kalibrace měřicí sondy. Měřicí operace jsou vkládány vždy po vyhrubování daných tvarových a rozměrových prvků. Mezioperační měření zde slouží ke korekci obráběcích nástrojů před dokončovacím obráběním.

Strategie aplikace mezioperačního měření navrženého testovacího obrobku je popsána v následujících krocích:

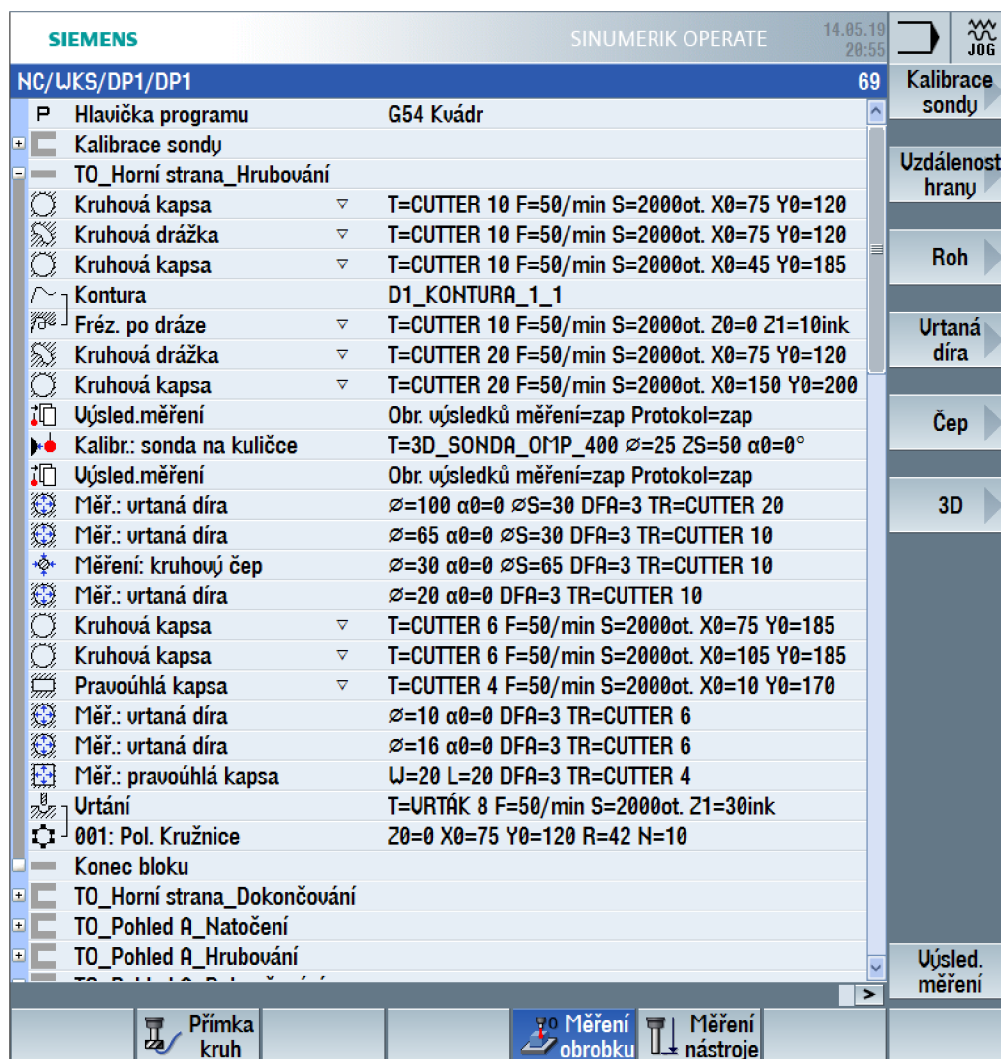
1. Třískové obrábění (Hrubování) – Provedení naprogramovaných obráběcích (hrubovacích) procesů. Spojené s výměnou měřicí sondy za příslušný obráběcí nástroj.
2. Definice výstupního protokolu – Opětovné vytvoření měřicího protokolu (funkce **Výsledky měření**) pomocí dialogového okna – Vytvoření protokolu měření (Obr. 4.16).



Obr. 4.16: Dialogové okno – Vytvoření protokolu měření (funkce **Výsledky měření**).

3. Kalibrace sondy pomocí kulového artefaktu – Opětovná kalibrace měřicí obrobkové sondy (funkce **Kalibrace na kuličce**) pomocí kulového artefaktu o průměru 25 mm. V operaci obsažena i výměna obráběcího nástroje za měřicí sondu.
4. Měření tvarových prvků – Aplikace měřicích cyklů na vyhrubované tvarové a rozměrové prvky. Na základě naměřených hodnot provedena korekce parametrů nástrojů vstupujících do procesu dokončování.
5. Třískové obrábění (Dokončování) – V návaznosti na provedené hrubování a následnou korekci parametrů obráběcích nástrojů dokončeno obrábění příslušné strany navrženého testovacího obrobku.

Nastíněná strategie mezioperačního měření je opět pro názornost vyobrazena pouze pro horní stranu testovacího obrobku (Obr. 4.17). Tato strategie je následně opakována pro každý z pěti stranových bloků (Příloha 4).



Obr. 4.17: Strom obráběcích a měřicích operací hrubování horní strany testovacího obrobku.

4.2.2.3 Měřicí operace po ukončení obráběcího procesu

Po završení dokončovací fáze obrábění dochází v programu k přesunu do oblasti měřicích operací, které jsou aplikovány po dokončení obráběcího procesu. I zde se tyto měřicí operace pětkrát opakují, a to z důvodu blokového rozdělení programu.

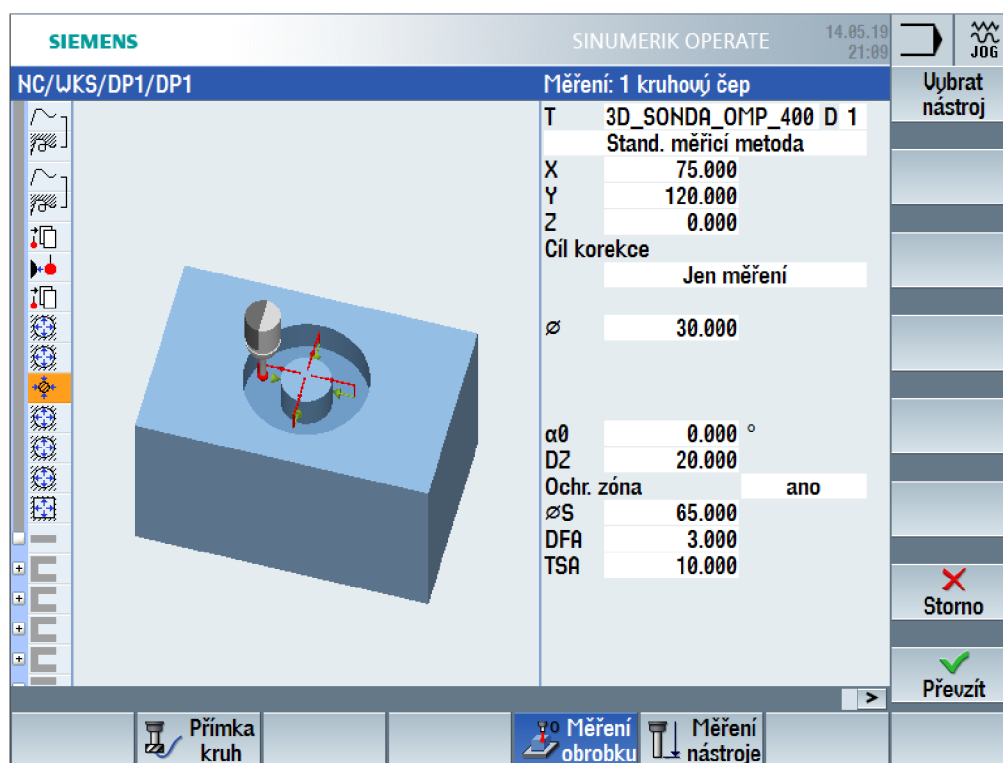
Finální vyhodnocení obrobeného testovacího obrobku se skládá ze série měřicích cyklů aplikovaných na dokončené tvarové a rozměrové prvky obrobku. Jako poslední krok jsou vygenerovány finální měřicí protokoly pro jednotlivé strany testovacího obrobku.

Operace měření, které jsou aplikovány na testovací obrobek po dokončení celého procesu obrábění, je možné nalézt v následujících bodech:

1. Definice výstupního protokolu – Vytvoření finálního výstupního měřicího protokolu (funkce **Výsledky měření**), a to vždy pro každý stranový blok jednotlivě. Generováno v podobě textového dokumentu.
2. Kalibrace sondy pomocí kulového artefaktu – Opětovná kalibrace měřicí obrobkové sondy (funkce **Kalibrace na kuličce**) pomocí kulového artefaktu

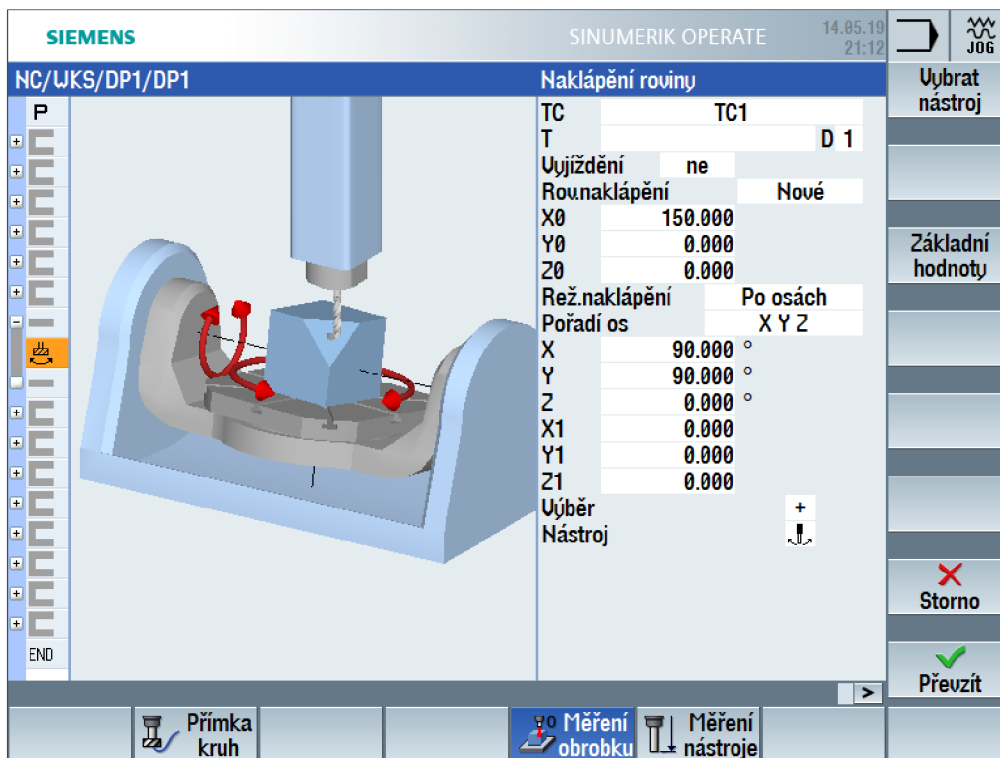
o průměru 25 mm. V operaci obsažena i výměna dokončovacího obráběcího nástroje za měřicí obrobkovou sondu.

3. Měření tvarových prvků – Aplikace měřicích funkcí na obrobené (tzv. na hotovo) tvarové a rozměrové prvky navrženého testovacího obrobku (Obr. 4.18).



Obr. 4.18: Dialogové okno – Měření dokončeného čepu (funkce **Měření: Kruhový čep**).

4. Natočení testovacího obrobku – Vložení integrované funkce ovládající natáčení a naklápění pracovního stolu obráběcího CNC centra. Při programování použita k tomu určená funkce **Naklápění roviny** (Obr. 4.19).



Obr. 4.19: Dialogové okno – Natočení testovacího obrobku (funkce **Naklápění roviny**).

Jak je zmíněno výše, zde popsané operace se v řídicím programu obrábění pětkrát opakují. Jednotlivé stranové bloky obrábění jsou vždy změřeny, přičemž výsledky těchto měření jsou zapsány do výstupního protokolu měření. Jak je rovněž zmíněno výše, tak kvůli přehlednosti jsou vyobrazeny pouze měřicí operace aplikované na horní stranu navrženého testovacího obrobku. Zbylé bloky je možné si prohlédnout v Příloze 4.

4.3 Porovnání možností NC programování

Srovnání použitých měřicích programů je poměrně složitý úkol. Existuje mnoho výhod a nevýhod, které ovlivňují jejich hodnocení. Je ovšem důležité říci, že ať už se hovoří o softwaru Productivity+™ od společnosti Renishaw s.r.o. nebo softwaru Sinumerik ShopMill od společnosti Siemens s.r.o., jedná se o vysoce kvalitní, v praxi prověřené programy s vysokou užitnou hodnotou. Problém nemožnosti dokonalého srovnání tkví k tom, že každý z těchto programů nalézá uplatnění u jiného koncového uživatele.

Program Sinumerik ShopMill nalézá své uplatnění hlavně v dílenském prostředí, kde dokonale uplatňuje své robustní a jednoduché ovládání. Jeho hlavní výhodou je fakt, že se nejedná pouze o měřicí program, ale o kompletní strojní řídicí systém, který umožňuje naprogramování celého procesu obrábění, a to včetně zmiňovaných měřicích operací. Na druhou stranu program disponuje výrazně menším množstvím specifických měřicích funkcí a také nižším uživatelským komfortem.

Zato program Productivity+™ cílí spíše na kancelářské prostředí, kde rovněž vyniknou jeho výhody. Největším plusem tohoto programu je jeho uživatelské prostředí a z něj plynoucí jednoduchá aplikace měřicích funkcí na tvarové prvky součásti. Jako nevýhoda se však jeví nutnost vkládání CAD modelu dané součásti, potřeba vhodného post processoru nebo nutnost vkládání externích G-kódů obrábění. Právě tyto mínusy mohou užívání tohoto softwaru výrazně prodražit.

Jak již bylo zmíněno výše, neexistuje jasný vítěz tohoto srovnání. Je tedy jen a pouze na rozhodnutí koncového uživatele jaký měřicí program si zvolí.

4.4 Ekonomické vyhodnocení zavedení NC měřicích operací

Ekonomická stránka třískového obrábění je dalším významným faktorem, který ovlivňuje celý proces výroby na CNC obráběcích centrech. Právě tyto technologie výroby umožnily obrovský rozmach kvalitní a vysoce přesné výroby všech kapacitních druhů. Ať už se jedná o kusovou nebo velkosériovou výrobu, vždy je přítomna snaha o minimalizaci finančních nákladů, tím pádem i maximalizaci vzniklého provozního zisku.

V současné době existuje nespočet dodavatelů obráběcích strojů, obráběcích nástrojů nebo konstrukčních materiálů. V podstatě každý výrobce těchto jednotlivých prvků třískového obrábění má ve svém portfoliu takové výrobky, které dokážou pokrýt potřeby prakticky každého výrobního procesu, a tím zvyšovat produktivitu daného výrobního procesu. Zároveň jsou vyvíjeny stále nové a svými vlastnostmi dokonalejší produkty. Tedy jediným prvkem vstupujícím do procesu třískového obrábění, který nelze jednoduše upgradovat, je čas.

Celková produktivita výroby, potažmo její ekonomická stránka, vychází ze schopností plného využití všech prvků výrobního řetězce. Ten se skládá z prvků: zvolený nástroj – upnutí nástroje – rezné podmínky – upnutí dílce – zvolená strategie obrábění – NC kód – možnosti a parametry stroje – řídicí systém. Zde je možné vidět, že všechny prvky tohoto řetězce nějakým způsobem ovlivňují čas potřebný pro výrobu dané součásti. Kupříkladu prvky zaměřující se na obráběcí nástroj (zvolený nástroj, upnutí nástroje, rezné podmínky) ovlivňují produktivitu obráběcího procesu schopnostmi a parametry daného nástroje, který může být používán za výhodnějších rezných podmínek. Zároveň vhodný systém upínání rezných nástrojů nejenže zrychluje jejich výměnu, ale rovněž zlepšuje možnosti korekce jejich rozměrových parametrů [44].

Vliv upnutí dílce bude rozebrán níže. Ale prvky významově navázané na obráběcí stroj (zvolená strategie obrábění, NC kód, možnosti a parametry stroje, řídicí systém) se rovněž významnou měrou podílejí na výsledné produktivitě obráběcího procesu. Veškeré tyto prvky vycházejí ze zvoleného obráběcího stroje a jeho možností a parametrů. Zde v závislosti na nich lze vytvořit NC kód obrábění, který bude využívat moderní technologie strojů, a tak snižovat časy potřebné pro hrubovací a dokončovací práce na daném dílci.

4.4.1 Problematika upnutí obrobku

Proces upnutí obrobku do obráběcího stroje je mnohdy značně zdlouhavý, tím pádem vysoce neproduktivní. Samotné upnutí a přesné nadefinování nulového bodu obrobku jsou důležité prvky obráběcího procesu, které mají zásadní vliv na celkový finální výsledek.

Upnutí obrobku je definováno jako soubor operací, které vedou ke správnému zajištění polohy obrobku vzhledem k obráběcímu nástroji a zabezpečení obrobku proti pohybu vzhledem k pracovnímu stolu desky. V neposlední řadě musí být zajištěno to, aby upnutím došlo k zachycení sil rezného procesu, které jsou vyvozovány obráběcím nástrojem. Důležité je rovněž, aby ono upnutí bylo dostatečně tuhé a zaručilo naprostou nehybnost obrobku. Tomu musí odpovídat i upínací síly, které musejí být takové, aby obrobek nebyl deformován [45].

Upnutí obrobku k pracovnímu stolu stroje a definování nulového bodu obrábění lze vykonat pomocí vícero metod. Asi nejstarší, stále používanou metodou je takzvané

naškrábnutí. V tomto případě je polotovár obrobku umístěn do upínky na pracovním stole stroje a pomocí rotujícího obráběcího nástroje je polotovár obrobku lehce naškrábnut. Naškrábnutím je myšlen příjezd nástroje mikroposuvem k polotovaru, v okamžiku vizuálního zpozorování kontaktu nástroje a polotovaru (tedy vzniku škrábance na polotovaru) je zaznamenána poloha nástroje. Tato činnost je opakována ve všech osách obrábění, čímž je zjištěn nulový bod obrábění obrobku. Nejčastěji je tento způsob používán v malosériové nebo středně sériové výrobě.

Další možností upnutí obrobku a zjištění jeho nulového bodu je použití speciálního přípravku. Tohoto způsobu je nejčastěji využíváno u výrobků, které jsou vyráběny ve velkých sériích. Zde je nulový bod obrobku definován samotným speciálním přípravkem. Nevýhodou je ovšem vysoká nákladnost těchto přípravků a jejich prakticky nulová multifunkčnost.

Poslední způsobem je pak využití měřicích sond. Tento způsob je ze všech zmíněných nejmodernější, a lze ho uplatnit ve všech kapacitních velikostech výroby. Jelikož obrobkové měřicí sondy přímo disponují funkcemi pro ustavování obrobku, je práce s nimi rychlá a bezproblémová. Obrovskou výhodou představuje i možnost úhlového natočení souřadnicového systému obrábění. Díky této funkci již nemusí být špatně ustavený polotovár obrobku ze stroje opětovně vyjímán a ustavován znovu, nýbrž je v závislosti na naměřených datech upraven NC kód obráběcího programu. Tento způsob upínání obrobků značně snižuje spotřebovaný čas na stroji, který tak může být využit pro obrábění dalšího obrobku (dílice). Celý proces obrábění se tak zrychluje, přičemž se zvyšuje i jeho produktivita.

4.4.2 Porovnání způsobů upínání obrobku

Nákup jakékoliv měřicí sondy představuje pro velkou většinou strojírenských firem značnou finanční investici. Proto se stále ještě některé firmy spokojují se zastaralým způsobem upínání obrobků, tedy metodou naškrábnutí. Pro porovnání metody naškrábnutí a metody ustavení pomocí měřicí sondy je navržen jednoduchý pokus, kdy bude zaznamenáván čas potřebný pro ustavení polotovaru testovacího obrobku a přesné definice jeho nulového bodu obrábění za použití obou metod.

Finálním výstupem zmíněného pokusu je pak ekonomické zhodnocení návratnosti investice do obrobkové měřicí sondy Renishaw OMP 400, softwaru Productivity+TM a dalšího příslušenství potřebného pro provozování tohoto typu obrobkové sondy. Při výpočtu ekonomického zhodnocení návratnosti investice do tohoto měřicího vybavení bylo postupováno podle následující metodiky.

4.4.2.1 Metodika měření ustavení polotovaru obrobku

Pro porovnání metod ustavení polotovaru obrobku byl navržen jednoduchý pokus, jehož podstatou je měření času potřebného pro vykonání všech operací potřebných pro definování jeho nulového bodu obrábění. Tento pokus je rozdělen do dvou částí, a to vždy v závislosti na zvoleném způsobu ustavení. Aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků, je počáteční stav pro obě části totožný. To znamená, že polotovár obrobku je již upnut ve sklíčidle umístěném na pracovním stole stroje. Zároveň je čas v obou případech měřen od okamžiku zavolání příslušného nástroje ze zásobníku. Ať už se jedná o rotační stopkovou frézu potřebnou pro ustavení pomocí naškrábnutí nebo o měřicí obrobkovou sondu potřebnou pro ustavení pomocí měřicích cyklů. Postup měření ustavení polotovaru obrobku způsobem naškrábnutí je následující:

1. Přivolání rotační stopkové frézy ($\varnothing 20$ mm) ze zásobníku nástrojů.
2. Přiblížení se k polotovaru obrobku pomocí rychloposuvu.

3. Sepnutí otáček nástroje (400 min^{-1}).
4. Pomocí setinového mikroposuvu naškrábnutí v jednotlivých souřadných osách (Obr. 4.20).
5. Definování nulového bodu polotovaru obrobku.
6. Odeslání stopkové rotační frézy zpět do zásobníku nástrojů.

Tento postup měření byl proveden pro čtyři rozdílné upnutí polotovaru obrobku tak, aby byl zajištěn dostatek naměřených dat.

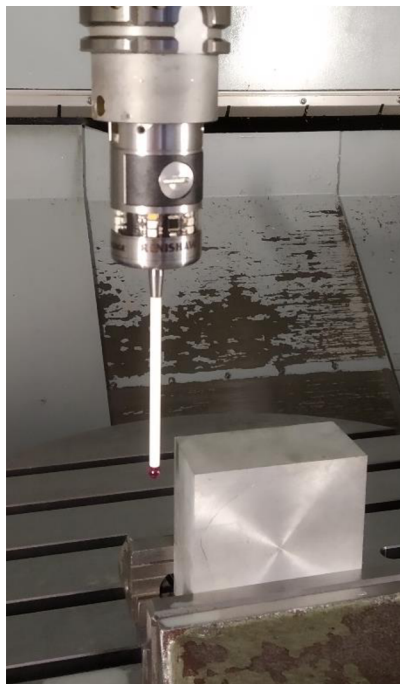


Obr. 4.20: Proces naškrábnutí polotovaru obrobku.

Postup měření ustavení polotovaru obrobku pomocí měřicí obrobkové sondy probíhal velice obdobě. Tento postup druhé části pokuse je naznačen zde:

1. Přivolání měřicí obrobkové sondy (Renishaw OMP 400) ze zásobníku nástrojů.
2. Přiblížení se k polotovaru obrobku pomocí rychloposuvu.
3. Softwarové sepnutí sondy.
4. Pomocí měřicího cyklu změřena poloha polotovaru v jednotlivých souřadných osách (Obr. 4.21).
5. Definice nulového bodu polotovaru obrobku.
6. Softwarové vypnutí sondy a její odeslání do zásobníku nástrojů.

I zde byl tento postup čtyřikrát zopakován, vždy pro rozdílné upnutí polotovaru obrobku.



Obr. 4.21: Proces měření polotovaru obrobku měřicí obrobkovou sondou.

Pro potřeby finálního výpočtu návratnosti této investice jsou změřené časy zprůměrovány, a to z důvodu eliminace extrémních hodnot měření. Následně budou použity následující výpočtové vztahy [46,47]:

- *Úspora času za použití měřicí sondy:*

$$t_{\text{ÚSP}} = t_{\text{RUČ}} - t_{\text{SONDA}} [\text{min}], \quad (4.1)$$

kde $t_{\text{RUČ}}$ představuje čas ručního upnutí polotovaru obrobku [min] a t_{SONDA} představuje čas upnutí polotovaru obrobku pomocí měřicí sondy [min].

- *Nominální časový fond:*

$$F_n = N_R - N_V - N_S [\text{den} \cdot \text{rok}^{-1}], \quad (4.2)$$

kde N_R představuje počet dnů za rok [den·rok⁻¹] a N_V představuje počet víkendových dnů za rok [den·rok⁻¹] a N_S představuje počet státních svátků za rok [den·rok⁻¹].

- *Efektivní časový fond:*

$$F_{\text{ef}} = F_n \cdot h \cdot s \cdot \left(1 - \frac{z}{100}\right) [\text{h} \cdot \text{rok}^{-1}], \quad (4.3)$$

kde F_n představuje nominální časový fond [den], h zastupuje počet hodin v jedné směně [h] a s představuje směnnost výroby [-].

- *Roční nákladová úspora při použití měřicí sondy:*

$$U = t_{\text{ÚSP}} \cdot F_{\text{ef}} \cdot S_s \cdot n [\text{Kč}], \quad (4.4)$$

kde $t_{\text{ÚSP}}$ představuje úsporu času za použití měřicí sondy [h], F_{ef} představuje efektivní časový fond [den·rok⁻¹], S_s označuje hodinovou sazbu stroje [Kč·h⁻¹] a n značí počet upínaných obrobků za hodinu [ks·h⁻¹].

- *Celková nákladová úspora:*

$$U_C = \dot{z} \cdot U - k \cdot P_C \text{ [Kč]}, \quad (4.5)$$

kde \dot{z} představuje životnost měřicí sondy [rok], U značí roční nákladovou úsporu při použití měřicí sondy [Kč], k označuje koeficient oprav [-] a P_C zastupuje celkové náklady na pořízení měřicí sondy a komunikačního modulu [Kč].

- *Hospodářská účinnost měřicí sondy:*

$$\eta = \frac{U_C}{P_C} \text{ [-]}, \quad (4.6)$$

kde U_C představuje celkovou nákladovou úsporu [Kč] a P_C zastupuje celkové náklady na pořízení měřicí sondy a komunikačního modulu [Kč].

- *Rentabilita:*

$$r = \eta - 1 \text{ [-]}, \quad (4.7)$$

kde η představuje hospodářskou účinnost měřicí sondy [-].

- *Minimální počet upnutí:*

$$n_{MIN} = \frac{P_C + k \cdot P_C}{t_{\dot{U}SP} \cdot S_s} \text{ [ks]}, \quad (4.8)$$

kde P_C zastupuje celkové náklady na pořízení měřicí sondy a komunikačního modulu [Kč], písmenem k je označen koeficient oprav [-], $t_{\dot{U}SP}$ představuje úsporu času za použití měřicí sondy [h] a S_s značí hodinovou sazbu stroje [Kč·h⁻¹].

- *Doba návratnosti investice:*

$$D_{NÁVRAT} = \frac{n_{MIN}}{H} \text{ [den]}, \quad (4.9)$$

kde n_{MIN} představuje minimální počet upnutí obrobku za použití měřicí sondy [ks] a písmenem H je označen počet hodin v jedné směně [h].

4.4.2.2 Výpočet návratnosti investice

Pro potřeby vyhodnocení návratnosti investice do obrobkové měřicí sondy Renishaw OMP 400 a potřebného příslušenství byla ve spolupráci s firmou Renishaw s.r.o. vypracována kompletní cenová kalkulace (Tab. 4.1). Do kalkulace jsou zahrnuty produkty nezbytně nutné pro správnou funkčnost obrobkové sondy a její integraci do procesu měření. Mezi zvolenými produkty je tedy možné nalézt samotnou tenzometrickou obrobkovou sondu OMP 400, dále pak optický komunikační modul s vestavěnou interface jednotkou OMI-2. Samotná sonda disponuje 100mm dotykem z uhlíkových vláken a rubínovou hlavičkou o průměru 6 mm. Jako dvě poslední položky kalkulace je možné nalézt měřicí software Productivity+™ a balíček CNC postprocessorů určených pro řídicí systémy Fanuc a Sinumerik.

Tab. 4.1: Cenová kalkulace investice do měřicího vybavení [48].

Produkt	Objednávací kód	Cena [Kč]
Obrobková sonda tenzometrická OMP 400	A-5069-2001	128 972
Optický komunikační modul OMI-2	A-5191-0049	48 860
Dotyk z uhlíkových vláken L100 D6	A-5003-6510	3 355
Software Productivity+™	A-4007-1400	70 000
Postprocessor (Fanuc + Sinumerik)		44 000
Celková výše investice [Kč]		295 187

Samotné měření bylo provedeno na obráběcím CNC centru MCV 1210 za přítomnosti pracovníka obsluhy stroje. Přičemž měření časů ustavení polotovaru obrobku probíhalo podle postupu navrženého v předchozí kapitole (4.4.2.1 Metodika měření ustavení polotovaru obrobku).

Z důvodu kapacitní vytiženosti obráběcího centra MCV 1210 byly pro každý zvolený způsob ustavení polotovaru obrobku změřeny časy čtyř ustavovacích cyklů. Naměřené hodnoty, pro oba způsoby ustavení obrobku, lze nalézt v následující tabulce (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Změřené časy ustavení polotovaru obrobku.

Číslo měření	Čas ustavení polotovaru obrobku pomocí naškrábnutí truč [min]	Čas ustavení polotovaru obrobku pomocí dotykové sondy tSONDA [min]
1	4,89	2,03
2	4,44	2,12
3	4,57	1,86
4	4,92	2,33
Průměrná hodnota	4,71	2,09

Z naměřených hodnot je patrný výrazný rozdíl mezi zvolenými způsoby ustavení polotovaru obrobku. Použití měřicí obrobkové sondy vykazuje v průměru o více než 2 minuty lepší výsledek než použití klasické metody naškrábnutí. Toto zjištění je dále detailně rozvedeno pomocí výpočtových vztahů. Do těchto vztahů vstupují i další veličiny, které je nutné definovat. Předně se jedná o *Hodinovou sazbu obráběcího CNC centra MCV 1210* (ve výpočtu nese označení: S_s). Její hodnota byla po konzultaci s operátorem stroje nastavena na částku $3\,000\text{ Kč}\cdot\text{h}^{-1}$. Dále pak *životnost měřicí obrobkové sondy* (ve výpočtu nese označení: λ). Zde bylo vycházeno z délky záruky garantované výrobcem dané sondy. Životnost vstupující do výpočtů byla tedy

nastavena na hodnotu 2 roky. Poslední nespecifikovanou veličinou je takzvaný *koeficient oprav stroje* (nesoucí označení: k). Tento koeficient byl opět volen po konzultaci s operátorem stroje, přičemž výsledná hodnota koeficientu je 5 % z hodnoty celé investice. Finální výpočet návratnosti investice následuje zde:

- *Úspora času za použití měřicí sondy* (dle vztahu 4.1):

$$t_{\dot{U}SP} = t_{RU\check{C}} - t_{SONDA} = 4,71 - 2,09 = 2,62 \text{ min} = 0,044 \text{ h}$$

- *Nominální časový fond* (dle vztahu 4.2):

$$F_n = N_R - N_V - N_S = 365 - 104 - 13 = 248 \text{ den} \cdot \text{rok}^{-1}$$

- *Efektivní časový fond* (dle vztahu 4.3):

$$F_{ef} = F_n \cdot h \cdot s \cdot \left(1 - \frac{z}{100}\right) = 248 \cdot 8 \cdot 1 \cdot \left(1 - \frac{0,95}{100}\right) = 1\,965 \text{ h} \cdot \text{rok}^{-1}$$

- *Roční nákladová úspora při použití měřicí sondy* (dle vztahu 4.4):

$$U = t_{\dot{U}SP} \cdot F_{ef} \cdot S_s \cdot n = 0,044 \cdot 1\,965 \cdot 3\,000 \cdot 1 = 259\,380 \text{ Kč}$$

- *Celková nákladová úspora* (dle vztahu 4.5):

$$U_C = \check{z} \cdot U - k \cdot P_C = 2 \cdot 259\,380 - 0,05 \cdot 295\,187 = 504\,001 \text{ Kč}$$

- *Hospodářská účinnost měřicí sondy* (dle vztahu 4.6):

$$\eta = \frac{U_C}{P_C} = \frac{504\,001}{295\,187} = 1,71$$

- *Rentabilita* (dle vztahu 4.7):

$$r = \eta - 1 = 1,71 - 1 = 0,71$$

- *Minimální počet upnutí* (dle vztahu 4.8):

$$n_{MIN} = \frac{P_C + k \cdot P_C}{t_{\dot{U}SP} \cdot S_s} = \frac{295\,187 + 0,05 \cdot 295\,187}{0,044 \cdot 3\,000} = 2\,348 \text{ ks}$$

- *Doba návratnosti investice* (dle vztahu 4.9):

$$D_{N\dot{A}VRAT} = \frac{n_{MIN}}{H} = \frac{2\,348}{8} = 294 \text{ dnů}$$

Z výpočtu návratnosti investice do měřicí obrobkové sondy Renishaw OMP 400 a příslušného měřicího vybavení vyplývá, že doba její návratnosti činí 294 dnů. Při pohledu na tento výsledek je nutné si uvědomit, že se jedná o investici do kompletního vybavení pro implementaci strojního měření do procesu výroby. Nejedná se tedy pouze o sondu samotnou, ale také o potřebné příslušenství a softwarovou podporu. Jak je zmíněno v práci výše, software Productivity+TM společně s příslušným postprocesorem představují vhodný nástroj pro programování měřicích cyklů a operací.

Zároveň je také nasnadě, že zvolená měřicí sonda může být využívána na nezměrné množství měřicích úkonů, a tak postupně přispívat k prohlubování automatizace procesu výroby v daném podniku. Právě tyto sondy jsou v první linii aplikace myšlenek Průmyslu 4.0.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá aplikací měřicích sond do procesu třískového obrábění (frézování) na CNC stroji MCV 1210, přičemž hlavním cílem práce je pak vytvoření vzorových postupů práce s měřicími sondami a jejich aplikace na navržený testovací obrobek.

První část práce, jenž je pojata jako rešeršní studie, se věnuje shrnutí poznatků o měřicích sondách. Přesněji se jedná o shrnutí vlastností, principů funkce a možností aplikace vybraných obrobkových a nástrojových sond. Dále jsou vytvořeny komparativní tabulky měřicích sond významných světových výrobců tohoto měřicího vybavení. Nechybí ani příklady moderních měřicích zařízení, která jsou budoucností strojírenské měřicí techniky. Jako poslední jsou v první části práce zmíněny používané metody měření v procesech třískového obrábění.

Jestliže se první část práce zaměřuje spíše na teoretický popis funkcí měřicích sond, tak druhá část se věnuje jejich aplikaci do reálných procesů třískového obrábění. Hlavní náplní druhé části diplomové práce je vytvoření vzorových postupů aplikace měřicích funkcí a cyklů, a to s využitím měřicích softwarů Productivity+TM a Sinumerik ShopMill. Součástí práce je i návrh testovacího obrobku, jehož 3D model slouží pro aplikaci měřicích funkcí a cyklů za použití zmíněných měřicích programů. Bohužel z důvodu kapacitní vytíženosti, nekompatibility řídicího systému stroje MCV 1210, a také licenčních požadavků měřicích softwarů nemohly být vytvořené měřicí operace aplikovány do reálného procesu měření na CNC stroji MCV 1210. Došlo tedy pouze k vizuální simulaci těchto měřicích operací v příslušných měřicích programech.

Poslední částí diplomové práce je ekonomické vyhodnocení návratnosti investice do obrobkové měřicí sondy Renishaw OMP 400 a dalšího potřebného měřicího vybavení. Toto ekonomické zhodnocení je podpořeno strojním měřením, které se zabývá měřením rychlosti ustavení polotovaru obrobku obrobkovou měřicí sondou. Následně je pomocí série výpočtů zjištěna návratnost celé této investice, která při výši investice 295 187 Kč činí 294 dnů. Přičemž je nutné si uvědomit, že ekonomické zhodnocení bere v potaz pouze čas ušetřený při ustavování polotovaru obrobku v pracovním prostoru obráběcího CNC stroje. Jedná se tedy jen o jednu z mnoha funkcí měřicí sondy, pomocí kterých se zasazuje o zvyšování produktivity výrobního procesu na obráběcích CNC centrech.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MAREK, Jiří a kolektiv. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2018. 427 s. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [2] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.
- [3] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. 4. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
- [4] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. 1. vydání. Praha: Grada, 2015. 240 s. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [5] RENISHAW.COM [online]. © 2001-2019 Renishaw plc. 2019. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/renishaw-zvy%C5%A1ov%C3%A1n%C3%AD-efektivita-ve-v%C3%BDrob%C4%9B-a-zdravotn%C3%AD-p%C3%A9%C4%8Di--1030>
- [6] Renishaw s.r.o. [online katalog]. *Snímací systémy pro CNC obráběcí stroje*. 2014. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. H-2000-3628-10-A. Dostupné z: [https://resources.renishaw.com/cs/download/\(652050b1403b4ea2927d69c8643876c6\)](https://resources.renishaw.com/cs/download/(652050b1403b4ea2927d69c8643876c6)).
- [7] DEL GUERRA, Marcelo a Reginaldo Teixeira COELHO. Development of a low cost Touch Trigger Probe for CNC Lathes. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. 2006, 179(1): 117-123 s. [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.093. ISSN 0924-0136.
- [8] MAREK, Tomáš a Jiří MAREK. *Mít sondu nestačí*. 1. vydání. Brno: Renishaw s.r.o., 2017. 121 s. ISBN: 978-80-87017-20-3.
- [9] LI, Rui-jun, Meng XIANG, Ya-xiong HE, Kuang-chao FAN, Zhen-ying CHENG, Qiang-xian HUANG a Bin ZHOU. Development of a High-Precision Touch-Trigger Probe Using a Single Sensor. *Applied Sciences* [online]. MDPI, 2016, 6(3): 86 s. [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.3390/app6030086. Dostupné z: <https://doaj.org/article/d127c25c5a9244a5a942b71539656cd9>
- [10] Heidenhain s.r.o. [katalog]. *Dotykové sondy pro obráběcí stroje*. 2017. Obj. č. 1113984-C1.
- [11] ČSN EN 60529. *Stupně ochrany krytem (KRYTÍ – IP KÓD)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1993.
- [12] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. 1. vydání. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. 42 s. ISBN 978-80-87240-65-6.
- [13] Renishaw s.r.o. [online katalog]. *Vysoce přesná optická strojní sonda OMP400*. 2016. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. H-5069-8206-03-B. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/c998c68d5d7e4ad6a9c394bfcf3de88c.pdf>
- [14] Hexagon AB [katalog]. *m&h Měřicí dotykové sondy s infračerveným přenosem*. 2017.

-
- [15] Blum-Novotest s.r.o. [online katalog]. *TC52 Dotyková sonda*. 2013. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.blum-novotest.com/cz/vyrobky/merici-komponenty/sondy/tc52-tc62.pdf>
- [16] Renishaw s.r.o. [online katalog]. *OTS optical tool setter (AA version)*. 2008. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. H-5514-8205-01-A. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/media/pdf/en/8d4e8f22bb404cca8515ca2c977bf60c.pdf>
- [17] Blum-Novotest s.r.o. [online katalog]. *3D nástrojová sonda ZX-Speed IR*. 2016. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.blum-novotest.com/cz/vyrobky/merici-komponenty/nastrojove-dotykovove-sondy/rada-zx-speed.pdf>
- [18] Blum-Novotest s.r.o. [online katalog]. *Řada LaserControl Laserové Měřicí Systémy s Technologií DIGILOG*. 2018. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/lasercontrol/LC50-DIGILOG/lasercontrol-digilog-cz.pdf>
- [19] Hexagon AB [online katalog]. *m&h Laser Tool Setter LTS35.65*. 2016. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. V01.00-REV02.00. Dostupné z: <https://go.hexagonmi.com/l/49752/2019-01-22/cmdq2q>
- [20] Renishaw s.r.o. [online katalog]. *Bezkontaktní systém ustavování nástrojů NC4*. 2007. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. H-2000-2244-05-B. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/34b21db2a3aa44d2b96e8e89a43df36e.pdf>
- [21] Blum-Novotest s.r.o. [online katalog]. *LaserControl Micro Compact NT*. 2018. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/lasercontrol/micro-compact-nt/micro-compact-nt-cs.pdf>
- [22] Petřkovská, Lenka a Lenka Čepová. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011. 101 s. ISBN 978-80-248-2723-0.
- [23] Mitutoyo Česko s.r.o [online katalog]. *Katalog měřicích přístrojů 2017–2019*. 2017. [cit. 2019-02-20]. Obj. č. CZ-20003. Dostupné z: <https://www.mitutoyo-eshop.cz/pdf/mitutoyo-katalog-cz-20003.pdf>
- [24] Kalibry závitové metrické: Trny – základní řada. *UNIMETRA.cz: UNIMETRA spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.unimetra.cz/cz/katalog/kalibry-merky-a-sablony/kalibry-zavitove/121-kalibry-zavitove-metricke-trny-zakladni-rada.html#!prettyPhoto>
- [25] Renishaw s.r.o. [online brožura]. *Equator™ gauging systems*. 2018. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. H-5504-8200-09-B. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/en/ddcfec4404044175b7d3568fc121a527.pdf>
- [26] MMSpektrum. Automatický kontrolní robot [online]. *MM Průmyslové Spektrum*. 2018, 10, s. 88. [cit. 2019-04-21]. Kód článku: 181026. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/automaticky-kontrolni-robot.html>
-

-
- [27] Renishaw s.r.o. [online katalog]. *Kontrolní systém Equator™ 300*. 2014. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. H-5504-8210-06-A. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/cs/details/brozura-merici-system-equator-300--65265>
- [28] Renishaw s.r.o. [online katalog]. *Vysoce výkonné pětiosé měření*. 2018. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. H-1000-0052-02-A. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/f564077a94c34c1c9dede6059617e43a.pdf>
- [29] Renishaw s.r.o. [online katalog]. *Bezkontaktní detekce zlomení nástroje – vylepšený systém TRS2*. 2010. [cit. 2019-02-18]. Obj. č. H-2000-3438-04-A. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/5cc82990165840d196df8e37047995cb.pdf>
- [30] Blum-Novotest s.r.o. [online katalog]. *LaserControl Micro Single NT*. 2018. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/lasercontrol/micro-single-nt/micro-single-nt-cs.pdf>
- [31] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3., dopl. vyd., dot. Praha: Scientia, 1999, 985 s. ISBN 80-7183-164-6.
- [32] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Milo. VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [33] MMSpektrum. Řídicí systémy a pohony pro obráběcí stroje [online]. *MM Průmyslové Spektrum*. 2007, 9, s. 78. [cit. 2019-03-05]. Kód článku: 070961. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ridici-systemy-a-pohony-pro-obrabeci-stroje.html>
- [34] Tajmac-ZPS a.s. [online katalog]. *Vertikální obráběcí centrum MCV 1210*. 2017. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: https://www.tajmac-zps.cz/media/files/product/item/files-20/MCV1210_CZ_042017.pdf
- [35] MMSpektrum. Obráběcí stroje ze Zlína [online]. *MM Průmyslové Spektrum*. 2005, 9, s. 52. [cit. 2019-03-05]. Kód článku: 050945. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeci-stroje-ze-zlina.html>
- [36] TAJMAC-ZPS, a.s. *MCV 1210 – Technická data* [online]. 2005. [2019-04-24]. Dostupné z: http://cadcam.fme.vutbr.cz/powermill/databaze/stroje/MCV1210_tech_data.doc.pdf
-

-
- [37] MMSpektrum. Měření na CNC frézovacích strojích [online]. *MM Průmyslové Spektrum*. 2011, 9, s. 82. [cit. 2019-03-07]. Kód článku: 110905. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-na-cnc-frezovacich-strojich.html>
- [38] MMSpektrum. Měřím, měříš, měříme...na obráběcím stroji [online]. *MM Průmyslové Spektrum*. 2015, 3, s. 42. [cit. 2019-02-28]. Kód článku: 150328. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/merim-meris-merime-na-obrabecim-stroji.html>
- [39] SIEMENS. *SINUMERIK 840D/840Di/810D Měřicí cykly: Příručka pro obsluhu*. 2004, 530 s. Obj. č. 6FC5298-7AA70-0AP1.
- [40] SIEMENS. *SINUMERIK 840D sl / 828D Měřicí cykly: Programovací příručka*. 2013, 530 s. Obj. č. 6FC5398-4BP40-3UA1.
- [41] Blum-Novotest s.r.o. [online katalog]. *Software FormControl*. 2015. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.blum-novotest.com/fileadmin/benutzerdaten/blum-novotest-de/pdf/downloads/messkomponenten/formcontrol/form-control-cs.pdf>
- [42] POWERINSPECT. *Porovnání edicí PowerInspect* [online]. © CAD CAM SYSTEMS S.R.O. 2018. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.powerinspect.cz/porovnani-edici/>
- [43] Hexagon AB [online katalog]. *m&h 3D Form Inspect Software*. 2018. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/machine-tool-probes/nc-measuring-software/mamph-3d-form-inspect-software.pdf>
- [44] MMSpektrum. Aktuální přístupy ke zvyšování produktivity třískového obrábění [online]. *MM Průmyslové Spektrum*. 2018, 6, s. 40. [cit. 2019-04-21]. Kód článku: 180621. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-pristupy-ke-zvysovani-produktivity-triskoveho-obrabeni.html>
- [45] STAVINOHA, Zdeněk. *Upínání nástrojů a obrobků na frézkách – prezentace* [online]. Digitální učební materiály – Technologie frézování. Internetový portál COPTEL, 2009-2014 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=39667&docGroup=-1&cmd=0&instance=2>
- [46] VLČEK, Michal. *Integrace měření do CNC obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [47] COROMANT, Sandvik. Technická příručka obrábění. *AB Sandvik Coromant*, 2005. ISBN 91-972299-4-6.
- [48] DUBENSKÝ, Antonín. *Cenová kalkulace – Renishaw s.r.o.* [elektronická pošta]. Message to: xhoracek.krystof@gmail.com. 6. května 2019 16:48 [cit. 2019-05-10]. Osobní komunikace.
-

POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
3D		Trojrozměrný
A	[%]	Tažnost
ADIF		Automatic Data Interface
a.s.		Akciová společnost
CAD		Počítačem podporované kreslení (Computer Aided Design)
CNC		Počítačem číslicově řízený (Computer Numeric Control)
ČSN		Česká technická norma
ČSN EN		Převzatá evropská norma
DIN		Německá národní norma (Deutsche Industrie Norm)
$D_{NÁVRAT}$	[den]	Doba návratnosti investice
E	[GPa]	Modul pružnosti v tahu
F_{ef}	[h·rok ⁻¹]	Efektivní časový fond
F_n	[den·rok ⁻¹]	Nominální časový fond
FSI		Fakulta strojního inženýrství
G	[GPa]	Modul pružnosti ve smyku
GHz		Gigahertz
GPa		Gigapascal
h		Hodina
H	[h]	Počet hodin v jedné směně
HB		Tvrдость dle Brinella
k	[-]	Koeficient oprav
Kč		Koruna česká
kg		Kilogram
ks		Kus
kW		Kilowatt
LED		Elektroluminiscenční dioda (Light Emitting Diode)
m		Metr
min		Minuta
mm		Milimetr
MPa		Megapascal
mW		Miliwatt
N		Newton
n	[ks·h ⁻¹]	Počet upnutých obrobků za hodinu
N/A		Nedostupné (Not Available)
NC		Numerical Control
nm		Nanometr
n_{MIN}	[ks]	Minimální počet upnutí
N_R	[den·rok ⁻¹]	Počet dnů za rok
N_S	[den·rok ⁻¹]	Počet státních svátků za rok
N_V	[den·rok ⁻¹]	Počet víkendových dnů za rok
OTK		Odbor technické kontroly
PC		Osobní počítač (Personal Computer)
P_c	[Kč]	Celkové náklady na investici
r	[-]	Rentabilita

Re	[MPa]	Mez kluzu
Rm	[Pa]	Mez pevnosti
s	[-]	Směnnost výroby
s.r.o.		Společnost s ručením omezeným
Ss	[Kč·h ⁻¹]	Hodinová sazba obráběcího stroje
TM		Trademark
t _{RUČ}	[min]	Čas ručního upnutí polotovaru obrobku
t _{SONDA}	[min]	Čas upnutí polotovaru obrobku měřicí sondou
t _{ÚSP}	[min]	Úspora času
U	[Kč]	Roční nákladová úspora
U _C	[Kč]	Celková nákladová úspora
USB		Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
VUT		Vysoké učení technické
z	[%]	Časové ztráty
ž	[rok]	Životnost měřicí sondy
η	[-]	Hospodářská účinnost měřicí sondy
μm		Mikrometr
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota materiálu
σ		Směrodatná odchylka
°C		Stupeň Celsia

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkresová dokumentace DP – 2019 – 1/1 – A1

Příloha 2 – Technická data MCV 1210

Příloha 3 – Productivity+TM strom měření

Příloha 4 – Sinumerik ShopMill G-kód obrábění