

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

POUŽITÍ MĚŘÍCÍCH SOND
(NÁSTROJOVÉ A OBROBKOVÉ)
PRO STROJE Z PRODUKCE TOS KUŘIM

USING MEASURING PROBES (FOR TOOLS AND WORKPIECES) FOR PRODUCTION
MACHINE OF RANGE OF PRODUCTS FIRM TOS KUŘIM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JOSEF KOHÚT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV OPL

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Josef Kohút

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

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:

Použití měřících sond (nástrojové a obrobkové) pro stroje z produkce TOS KUŘIM

v anglickém jazyce:

Using measuring probes (for tools and workpieces) for production machine of range of products firm TOS KUŘIM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku postprocesní popř. inprocesní kontroly obrobků a nástrojů na výrobních strojích z produkce TOS kuřim. Nasazení prostředků procesní kontroly pro optimalizaci výrobního procesu, jako je např. zkrácení nevýrobních časů, zvýšení jakosti a produktivity výroby.

Cíle diplomové práce:

1. Popis možností měření obrobků a nástrojů na vytipovaných strojích.
2. Testování navrženého měřícího systému s vyhodnocením dosahované přesnosti.

Seznam odborné literatury:

<http://www.renishaw.cz>

<http://www.heidenhain.cz>

http://www.marposs.com/welcome_page.php/eng/mida

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Opl

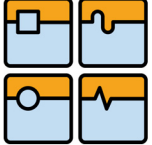
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

ABSTRAKT

Práce má seznámit čtenáře se základním rozdělením sond pro měření obrobků a nástrojů. Zejména pak v oblasti měření na CNC obráběcích centrech. Je zde uvedeno jejich třídění jak z hlediska principu funkce senzorů a druhu přenosu signálu do řídicího systému, tak i z hlediska konstrukčního provedení. Dále se zabývá příslušenstvím těchto sond (doteky atd.) a pravidly pro jeho vhodný výběr. V další části práce je uveden výběr vhodných sond k jednotlivým univerzálním strojům s produkce firmy TOS Kuřim. Poslední část práce se zabývá testováním navrženého měřícího systému pro konkrétní stroj z produkce firmy TOS Kuřim. Je zde uvedena jeho typová skladba, vyhodnocení výsledků testovacích měření a dosahovaná přesnost.

ABSTRACT

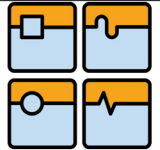
The purpose of this dissertation is to familiarize the reader with basic recognition of machine measuring probes for tools and workpieces. Namely then in area of measurement on CNC machining centers. Both recognition from aspects of principle of function of sensing elements and type of transmission to control system, and recognition from constructional aspects are described here. Further it puts mind on equipment of machine probes (touches etc.) and rules for best selection of this equipment. Next part of this work describes selection of appropriate probes, for universal machines from production of firm TOS Kuřim. Last part deals with testing of designed measuring system for concrete machine from production of firm TOS Kuřim. His typical composition, evaluation of tests results and achieved accuracy is also described here.

KLÍČOVÁ SLOVA

sonda, obrobek, nástroj, měření, CNC obráběcí centrum


KEYWORDS

probe, work-piece, tool, measuring, CNC machining center

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

Bibliografická citace mé práce:

KOHÚT, J. *Použití měřících sond (nástrojové a obrobkové) pro stroje z produkce TOS KURIM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Opl.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

PODĚKOVÁNÍ

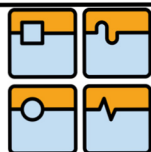
Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Miroslavu Oplovi za cenné názory a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat svému technickému konzultantovi v podniku TOS Kuřim, Petru Křivanovi Dis. za ochotu a nasazení při řešení celého úkolu.

PROHLÁŠENÍ


Prohlašuji, že sem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

Bc. Josef Kohút,
v Brně dne __.__.2011


.....

**OBSAH**

ABSTRAKT	5
PODĚKOVÁNÍ.....	7
PROHLÁŠENÍ	7
1. ÚVOD.....	10
2. POPIS MOŽNOSTÍ MĚŘENÍ OBROBKŮ A NÁSTROJŮ NA VYTIPOVANÝCH STROJÍCH	11
2.1 Sondy pro ustavení a proměření obrobku	11
2.1.1 Ustavení a proměření obrobku.....	12
2.1.2 Princip funkce 3-D dotykových sond.....	14
2.1.3 Vyměnitelné doteky a nástrojové držáky	19
2.2 Sondy pro kontrolu nástrojů	22
2.2.1 Kontaktní měření nástroje.....	23
2.2.2 Laserové měření a kontrola poškození nástroje	24
2.2.3 Detekce poškození nástroje.....	26
2.3 Způsoby řízení obrobkových a nástrojových sond.....	27
2.4 Přesnost, reprodukovatelnost a rychlost snímání	28
2.5 Kalibrace sond.....	30
3. VÝBĚR VHODNÝCH SOND K JEDNOTLIVÝM STROJŮM.....	31
3.1 Výběr vhodných sond	31
3.1.1 Obrobkové sondy.....	31
3.1.2 Bezkontaktní nástrojové sondy	32
3.1.3 Dotykové nástrojové sondy	33
3.1.4 Sondy pouze pro kontrolu poškození nástroje	33
3.2 Portálové CNC frézovací centra	33
3.3 CNC frézovací centra s posuvným stojanem.....	35
3.4 Ložová CNC frézovací centra.....	37
3.5 Horizontální CNC centra s pevným rámem	38
4. TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉHO MĚŘÍČÍHO SYSTÉMU S VYHODNOCENÍM DOSAHOVANÉ PŘESNOSTI	39
4.1 Zdůvodnění výběru sond a jejich technická specifikace	39
4.1.1 Specifikace stroje, na kterém se sondy použijí	39
4.1.2 Volba obrobkové sondy	41
4.1.3 Volba nástrojové sondy:.....	43
4.2 Popis možností měření s obrobkovou a nástrojovou sondou	45
4.3 Programování obrobkové a nástrojové sondy	45
4.3.1 Způsoby řízení obrobkové sondy RMP 60	45
4.3.2 Program nástrojové sondy	50
4.4 Vyhodnocení dosahované přesnosti měřicího systému	51
4.4.1 Obrobková sonda RMP 60.....	51
4.4.2 Nástrojová sonda.....	54
4.5 Testování měřicího systému	55
4.5.1 Testování obrobkové sondy	55
4.5.2 Testování laserové nástrojové sondy.....	67
4.6 Porovnání struktury vedlejších výrobních časů při použití obrobkové sondy a bez ní.....	72
4.6.1 Průměrný čas upnutí a vyrovnání testovacího kusu ručně a se sondou ...	73
4.6.2 Vliv použití obrobkové sondy na strukturu vedlejších výrobních časů:.....	76
4.7 Ekonomické zhodnocení obrobkové sondy	79

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

5. ZÁVĚR	80
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	81
POUŽITÉ SYMBOLY	83
SEZNAM PŘÍLOH	84

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

1. ÚVOD

Pro začátek si položíme jednu otázku: Proč vůbec používat sondy k měření obrobku a nástroje?

Protože tyto sondy se díky automatickému měřicímu cyklu výborně hodí pro zavádění bezobslužných provozů na strojích s možností automatické výměny obrobku a nástroje. V případě, že možnost automatické výměny obrobku není, mohou posloužit alespoň k automatickému ustavení a proměření součásti. Tím výrazně ulehčí práci obsluze stroje a zkrátí nevýrobní časy.

Stroj který je závislý na ruční obsluze, se musí zastavit, poté ustavit a náležitě vyrovnat polotovary. Popř. dopravit obrobek k měření na souřadnicový měřicí stroj, změřit potřebné rozměry a dokončit kus nebo zavést potřebné opatření ve výrobě. To je poměrně zdlouhavý proces, nesoucí možné riziko vzniku chyb ze strany obsluhy.

Ustavení polotovaru a měření obrobku (po nebo v průběhu obrábění) může bez problému vykonávat obrobková sonda. Navíc celá činnost může probíhat v automatickém cyklu, bez rizika špatného ustavení polotovaru (a vyrobení zmetkové součásti).

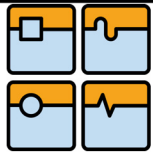
Dalším důvodem, kvůli kterému se zavádí měření přímo na stroji, je že obrobek může být příliš velký na to, aby se mohl změřit na souřadnicovém měřicím stroji (CMM), kterým daná firma disponuje. Proto zde v případě velkých strojů (např. pokud je pracovní pojezd některé z os 25 m) ani není možnost obrobek změřit jinak než tímto způsobem.

Také nástroj mění své rozměry v důsledku mechanického opotřebení. Rozdíl skutečné hodnoty průměru a délky nástroje oproti hodnotě zadané v korekční tabulce nástroje se přímo promítne do rozměrů obrobku. Proto je vhodné rozměry nástroje nějakým způsobem korigovat. Korekce může probíhat např. tak, že se nástroje změří na specializovaném pracovišti. Korekce se poté zavedou ručně, přímo na ovládacím panelu stroje.

Při použití nástrojových sond je nástroj pravidelně kontrolován a korekce se zavedou automaticky. Je zde i možnost zablokování a automatické výměny za sesterský nástroj, v případě že přesáhl kritickou hodnotu (konfidenční mez) některého z měřených rozměrů, nebo pokud je poškozen. V aplikacích, kde se nepožaduje velká přesnost je možné provádět korekce nástroje nepřímou, měřením pracovního kusu obrobkovou sondou.

Hlavní výhodou těchto sond je to, že měřicí cyklus je mnohem kratší. Stroj se tedy může věnovat déle vlastnímu obráběcímu procesu. Čím déle stroj obrábí, tím více kusů vyrobí a tím větší je i konečný zisk. Tyto sondy dokáží zkrátit vedlejší výrobní časy jako např. dobu ustavení obrobku, proměření hotového dílce a měření skutečného průměru opotřebovaného nástroje (podle výrobců sond, se u některých druhů operací vedlejší časy zkrátí až o 90%). Dokáží také včas rozpoznat poškozený nástroj nebo chybu některého z kritických rozměrů na právě obráběném kusu. Tím snižují zmetkovitost a zvyšují flexibilitu výroby.

Problematikou automatického měření obrobku a nástroje na obráběcích strojích se v současnosti zabývá celá řada firem, mezi které patří např. Heidenhain, Renishaw, Blum-Novotest, Marposs, Fidia a M&H.



2. POPIS MOŽNOSTÍ MĚŘENÍ OBROBKŮ A NÁSTROJŮ NA VYTIPOVANÝCH STROJÍCH

Firma TOS Kuřim – OS, a.s. patří mezi výrobce těžkých obráběcích CNC strojů. Mezi jejich hlavní sortiment patří portálová obráběcí centra a obráběcí centra s posuvným stojanem. Dále pak ložová obráběcí centra a horizontální obráběcí centra s pevným rámem. Jde tedy typově o velmi odlišné stroje. Hlavním rozdílem je velikost pracovního prostoru. Proto bude práce nejdříve zaměřena na popis různých typů sond, jejich vlastností a možností jaké nabízejí. Výběr vhodných sond k jednotlivým strojům bude zpracován v další kapitole.

Při výběru sond a popisu možností měření se omezím na sondy určené pro CNC obráběcí centra, protože TOS Kuřim je firma vyrábějící převážně tyto stroje.

TOS Kuřim vyrábí i jednoúčelové stroje. Použití sond na těchto strojích by se ale muselo prodiskutovat s odběratelem a posoudit pro každý stroj zvlášť.

2.1 Sondy pro ustavení a proměření obrobku

V současnosti se k měření obrobku nejvíce používají 3-D dotykové sondy. Je zde i možnost použití jednosměrných nebo dvousměrných dotykových sond. Doba jejich práce je ale výrazně vyšší, protože se vřeteno musí během měření několikrát natáčet vždy čelem sondy k snímané ploše. Další nevýhodou těchto sond je nemožnost snímání v ose Z.

Většina výrobců rozděluje sondy podle technologie obrábění pro jakou se použijí (pro soustruhy, frézovací stroje, brusky atd.) dále podle přesnosti sondy (standartní přesnost, vysoká přesnost) a druhu přenosového modulu, jakým jsou vybaveny (rádiový, optický, indukční, pro ruční upínání s kabelem).

3-D obrobkové měřicí sondy pro CNC obráběcí centra slouží k ustavení obrobku a nastavení nulového bodu, aktivní kontrole jeho problémových rozměrů v průběhu obráběcího cyklu a finální kontrolu již hotového dílce před jeho vyjmutím ze stroje.

K příslušenství patří kromě těla samotné sondy a montážního náradí ještě vyměnitelný dotek chráněný střížnou spojkou proti poškození senzoru sondy při kolizi, univerzální nebo pevný nástrojový držák pro upnutí do vřetena a kombinovaný přijímač/vysílač signálu zapojený do NC řízení stroje (popř. kabel). [8]



Obr. 2.1: 3-D dotyková sonda k měření obrobků s optickým přenosem signálu Heidenhain TS 640. [6]

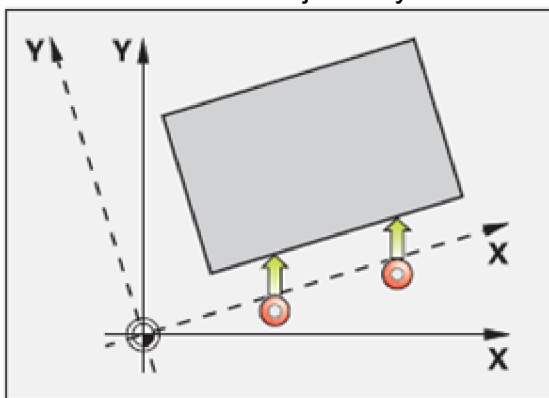
2.1.1 Ustavení a proměření obrobku [6,7]

A. Ustavení obrobku:

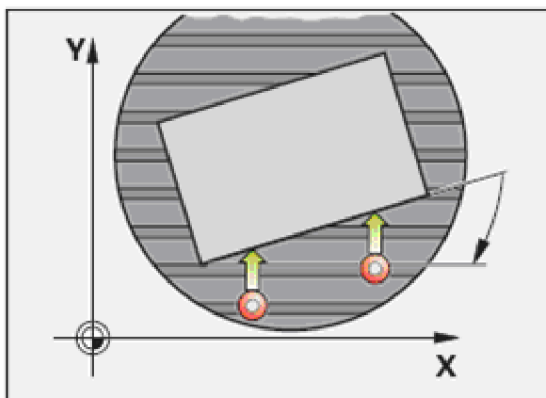
Oproti ručnímu upínání číselníkovými úchylkoměry nebo konstrukci drahého upínacího přípravku mají obrobkové sondy, které se upínají do vřeten obráběcích center tu výhodu, že eliminují chybné upnutí vlivem špatné obsluhy stroje na minimum. Tím výrazně snižují zmetkovitost. Obrobek se jednoduše upne do libovolné polohy na upínací desce (s definovanou max. odchylkou od ideální polohy, např. $\pm 5^\circ$ k hraně stolu). Dotyková sonda pak vyhodnotí nasnímáním jedné plochy, dvou otvorů, hran nebo čepů úhel odklonu obrobku a natočí souřadný systém CNC stroje, popř. pootočí rotační stůl. Stejným způsobem se zjistí souřadnice nulového bodu obrobku. Ve výsledku je obrobek ustaven se stejnou přesností, jako kdyby byl upnut v upínacím přípravku. Nevýhodou těchto přípravků je to, že jsou buď jednoúčelové nebo univerzální, ale v tom smyslu že jdou použít pouze v malém rozsahu změny rozměrů oproti sondě, která bez problému obsluží celý pracovní prostor stroje. To zvyšuje flexibilitu výroby (např. před zahájením sériové výroby se nemusí čekat na konstrukci již zmiňovaného upínacího přípravku atd.), také rychlost procesu ustavení se výrazně zvýší, protože sonda dokáže pracovat rychle a ve srovnání s ručním ustavováním nedělá žádné zbytečné pohyby.

Ustavení pomocí obrobkové sondy má tedy oproti ručnímu tyto výhody:

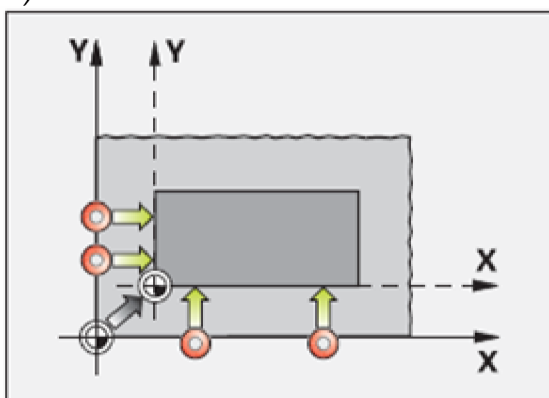
- Snižování počtu zmetků vzniklých špatným upnutím
- automatické ustavení obrobku - nastavení nulového bodu a natočení souřadného systému, popř. pootočení rotační osy stolu
- zkrácení vedlejších výrobních časů.



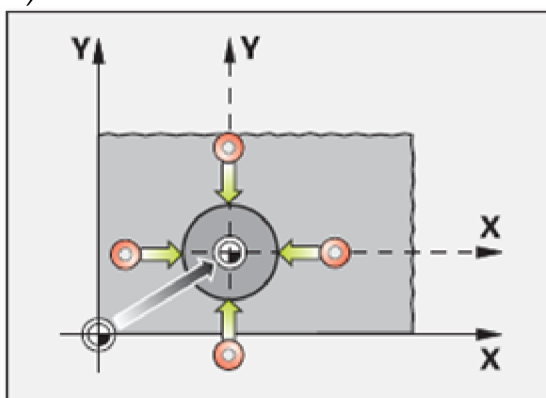
a)




b)



c)



d)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 13
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

*Obr. 2.2: a) Natočení souřadného systému stroje pomocí obrobkové sondy;
b) kompenzace odklonu natočením rotačního stolu;
c) zjištění nulového bodu obrobku pomocí 2 hran;
d) posunutí nulového bodu do středu čepu. [6]*

B. Proměření obrobku

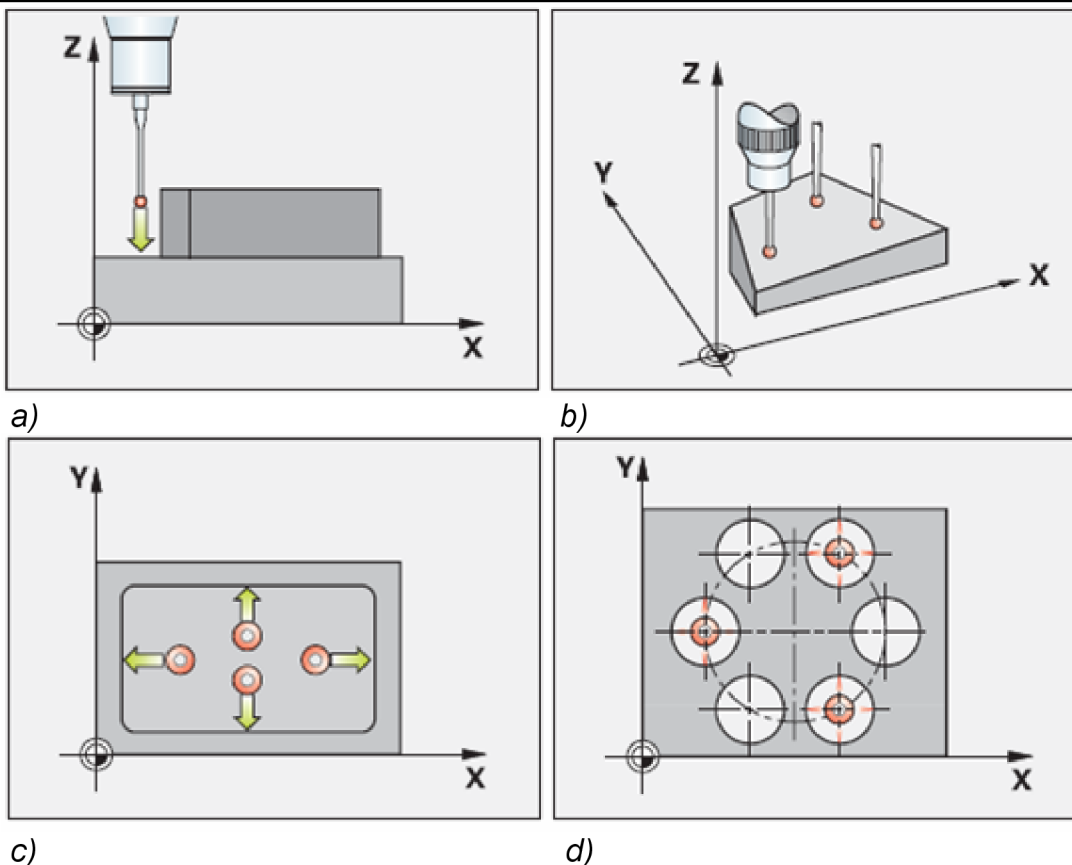
Obrobkové sondy lze také využít k měření dílce během obráběcího cyklu a ke kontrole prvního kusu výrobní dávky přímo na stroji. V návaznosti na výsledek kontroly lze zavést automatické nastavení velikosti posledního (dokončovacího) úběru v řídicím NC programu, tzv. adaptivní obrábění. Např. se obrobek vyhrubuje, proměří a dokončí na jmenovitý rozměr s minimalizací odchylek.

Oproti tomu ruční kontrola závisí příliš na dovednostech obsluhy a měření mimo stroj je doprovázeno obtížnou manipulací (při zjištění opravitelné chyby, se musí obrobek znovu upnout a dokončit). V některých případech (větší stroje z výroby TOS Kuřim) ani není možnost změřit obrobek jinde než přímo na stroji, protože není dostupný souřadnicový měřicí stroj s dostatečně velkým pracovním prostorem.

V každé hromadné výrobě se také řídí kvalita a používají se pro to různé procesy kde se statisticky zpracovávají data např. pro posouzení stavu stroje nebo SPC - Statistical proces control. SPC se provádí tak, že pracovník pravidelně odebírá z každé výrobní dávky ve stejných časových úsecích několik kusů a změří je. Odchylka skutečného rozměru a její velikost od jmenovitého se spočítá a zaznamená do grafů. Poté se zavedou potřebné protipatření ve výrobě. Tuto činnost může vykonávat bez problému obrobková sonda, tak že pravidelně kontroluje zadaný počet kusů přímo na stroji. Všechny rozměrové chyby na obrobku jsou důkladně zaznamenány. Protokol chyb lze vypsát do PC přes datové rozhraní CNC řízení. 3-D sonda umí snímat libovolné plochy, to znamená že může převést pomocí externího digitalizačního software (např. FormControl, 3DSI – 3D Shape Inspector) skutečný povrch do CAD modelu. To je výhodné při dokončování již rozpracovaných kusů. Digitalizovaný tvar je možné srovnat s ideálním CAD modelem a zvýraznit místa mimo nastavené toleranční pásmo, nahrát do obráběcího programu a dále zpracovávat.

Měření obrobku přímo na stroji má tedy tyto přednosti :

- Zvýšená jistota v bezobslužných provozech
- lepší podpora statistického zpracování procesů
- adaptivní obrábění zajišťující zpětnou vazbu na stroj a automatická korekce nastavení stroje po proměření prvního kusu výrobní dávky
- zkrácení nevýrobního času stroje čekajícího na výsledky kontroly prvního kusu výrobní dávky
- možnost digitalizace skutečného povrchu obrobku (tvorba CAD modelu reálné součásti). [7]




Obr. 2.3: Měření obrobku dotykovou sondou:
a) Proměření jednotlivé polohy v jedné ose;
b) proměření úhlu sklonu roviny;
c) proměření pravoúhlé kapsy;
d) proměření děr na roztečné kružnici. [6]

2.1.2 Princip funkce 3-D dotykových sond [6, 7, 15]

Tyto sondy jsou opatřeny dotykovým hrotem, který se vychýlí při kontaktu s hranou nebo plochou obrobku. Tím se aktivuje spouštěcí signál, který se přeneše do řídicího systému stroje. Buď pomocí kabelu, rádiového signálu nebo jako infračervený světelný paprsek. Řídicí systém pak synchronně uloží hodnotu polohy jednotlivých os. Spínací signál se tvoří ve speciálním senzoru pevně spojeném s dotykem sondy viz. kapitola I. V podstatě tedy nejde o nic jiného než o velmi přesné spínače upevněné ve vřetenu stroje.

Sondy bývají často vybaveny také ofukovacím zařízením, aby nedošlo vlivem nečistot ke zkreslení údajů o měření. Ofukovací zařízení se skládá většinou ze 3 trysek na stlačený vzduch, zaměřených na okolí dotyku. Stlačený vzduch pak odstraňuje hrubé nečistoty i chladicí emulzi z měřeného prostoru. Vlastní použití je ale možné pouze na strojích s vnitřním přívodem stlačeného vzduchu osou vřetena.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 15
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

I. Senzory 3-D sond

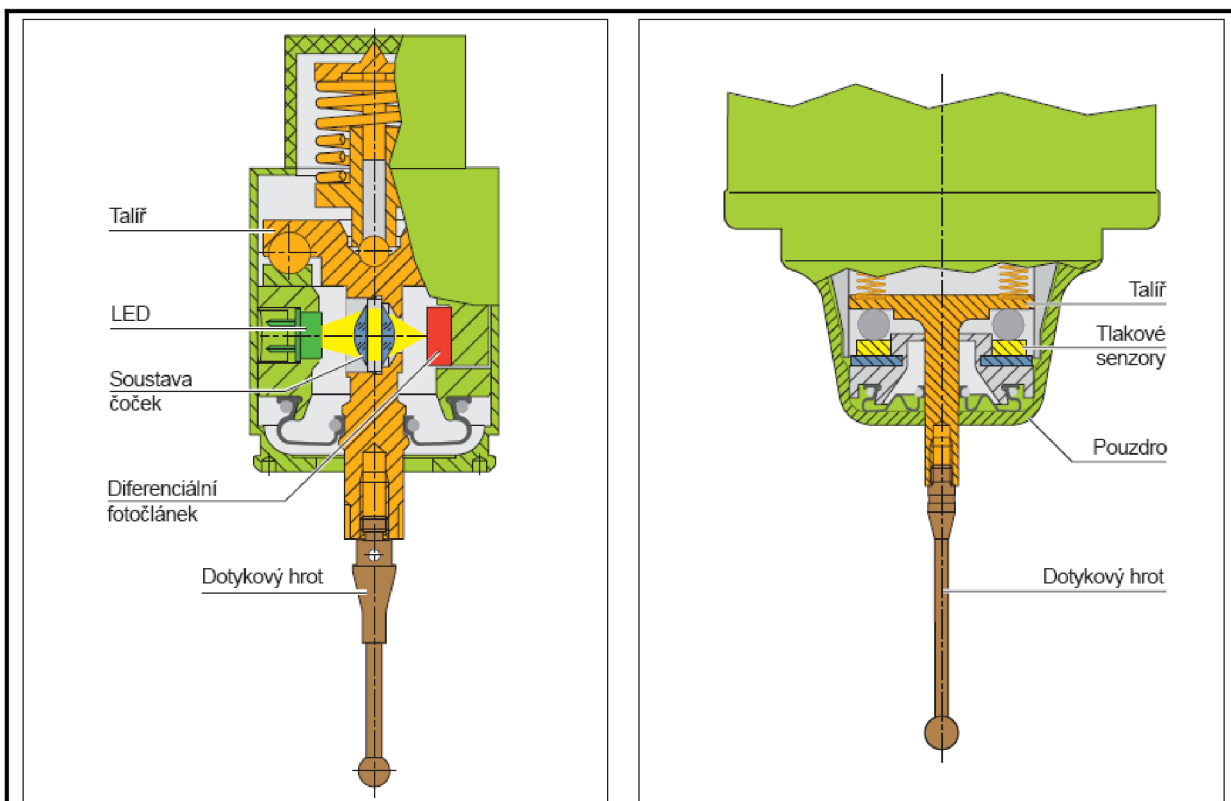
V praxi je možno najít mnoho různých principů, každá firma používá svůj vlastní. Nejvíce se používají sondy pracující s optickými, tlakovými, tenzometrickými nebo odporovými senzory. Senzory jsou uloženy třibodově, protože rovina měření je z matematického hlediska dána právě třemi body.

a) Optický senzor - Nejčastěji pracují 3-D dotykové sondy s jedním optickým snímačem ve funkci senzoru. Světelné paprsky vycházející z LED diody, jsou zaostřeny soustavou čoček a poté dopadají jako světelný bod na diferenciální fotočlánek. Při vychýlení dotykového hrotu sondy vygeneruje diferenciální fotočlánek spínací signál, který je dále zpracován v NC řízení. Senzor sondy tedy pracuje na principu bezdotykového optického snímače a je zcela bez opotřebení. To zabezpečuje jeho dlouhodobý provoz. - Obr. 2.4 a)

b) Tlakový senzor – Dotykový hrot je připevněn k čepu prizmatického nosného talíře, který je uložen v tělese sondy v třibodovém ložisku. Při vychýlení hrotu na senzory působí tlak a ten je pomocí piezoelektrických senzorů převeden na určitou hodnotu napětí. Vzniklé signály jsou přepočítány při kritické hodnotě tlaku se vygeneruje spínací signál. Používají se u přesných sond - Obr. 2.4. b)

d) Odporové senzory – Hrot sondy je spojen s čepem nosného talíře, který je uložený 3 bodově pomocí 3 válečků z nevodivého materiálu. Každý z nich je uložen na dvou kuličkách, jimiž prochází proud a jsou k sobě přitlačovány pružinami. Pokud se dotek vychýlí, válečky z nevodivého materiálu oddálí kuličky od sebe. Vzniklá vzduchová mezera má za následek prudký nárůst odporu. Při kritické hodnotě odporu čidlo vygeneruje spínací signál. Po odlehčení vrátí pružiny kuličky do původního stavu.

e) Tenzometrické senzory - Velmi přesný druh snímače, tenzometrické sondy jsou určeny pro náročné aplikace např. pro výrobce vstřikovacích forem. Je zde využito senzorů, které snímají síly a momenty ve všech 3 osách. Nejčastěji se registruje změna odporu drátu vlivem jeho protažení nebo zkrácení. Mají vysokou citlivost. Vyznačují se dlouhým dotykem (150 mm) s malou kuličkou (\varnothing 0,2 mm).

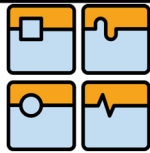


a)
b)
Obr. 2.4: Principy fungování senzorů 3-D dotykových sond:
a) LED dioda + diferenciální fotočlánek;
b) tlakové senzory. [6]

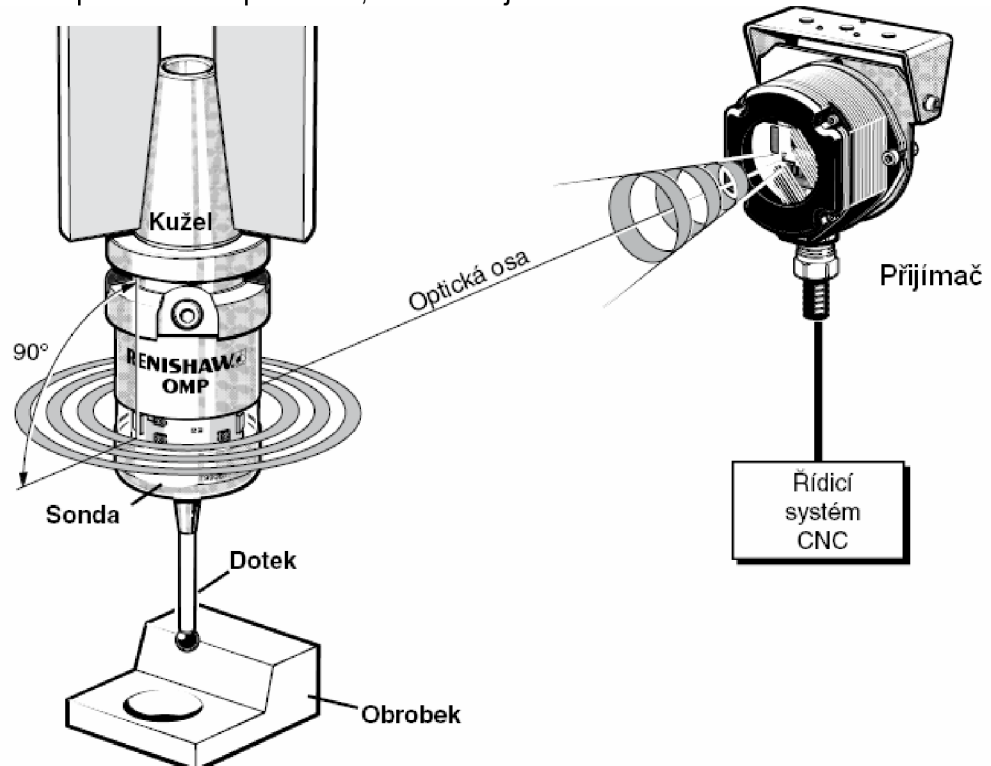
II. Druhy přenosu signálu do řídicího systému u 3-D obrobkových sond

a) Provedení s kabelem – Jsou určeny pro ruční upínání do vřetena stroje. Napájeny jsou pomocí kabelu, sloužícímu zároveň pro přenos signálu. Před upnutím musí být vřeteno zpevněno polohovou vazbou (stop vřetena). Lze je využít jak pro vertikální, tak i horizontální vřetena.

b) Obrobkové sondy v bezkabelovém provedení – Jsou určeny pro vertikální, horizontální a portálová CNC centra s možností automatické výměny nástroje. Skládají se ze sondy vybavené příslušnými komunikačními moduly a přijímacími jednotkami. Napájeny jsou pomocí 2 baterií velikosti AA (alkalické, lithiové) nebo pomocí vzduchové turbíny s integrovaným generátorem, která pravidelně nabíjí kondenzátory sondy. Pro využití vzduchové turbíny je ale potřeba vnitřní přívod stlačeného vzduchu vřetennem. Pro bezdrátový přenos signálu mezi vysílací a přijímací jednotkou se používá infračervený, nebo rádiový přenos. Je zde i možnost přenosu indukčního, ten se ale příliš často nepoužívá, protože funguje pouze na velmi krátkou vzdálenost (2 až 4 mm).



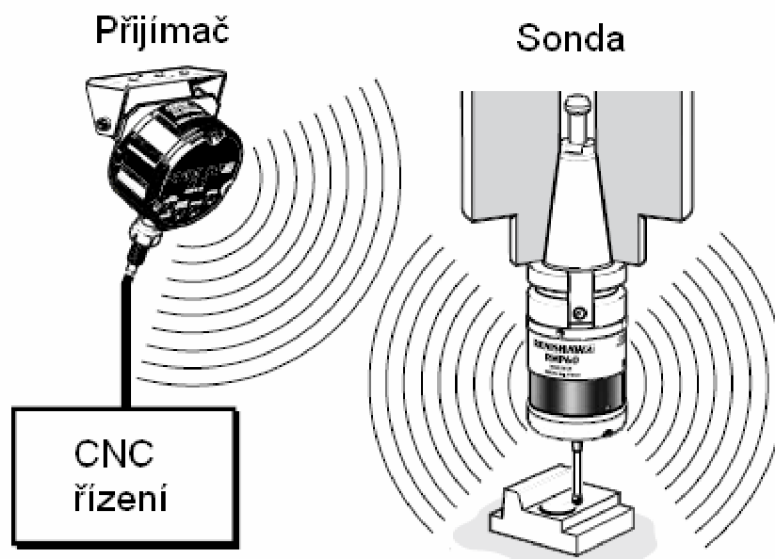
- **Infračervený optický přenos** – Tento druh přenosu využívá infračervené světelné paprsky, které jsou necitlivé vůči vnějšímu rušení. Jde zachytit i odraz těchto paprsků od pevného materiálu. Díky tomu pokrývá poměrně širokou oblast. Rovnoměrně po obvodu sondy jsou umístěny LED diody a přijímací moduly infračerveného přenosu (většinou po 8 kusech). Pracovní oblast infračerveného přenosu má tvar laloku se sklonem 0° vůči horizontální rovině. Vyrábí se i provedení s jiným sklonem optické osy. Nejčastěji je to 30° , někteří výrobci mají provedení i se sklonem 60° nebo s přijímacími moduly uloženými střídavě pod úhlem $\pm 30^\circ$ pro širší oblast přenosu. Pokud je signál rušený je to hlášeno prostřednictvím pohotovostního signálu do NC řízení. Dosah sond se liší v závislosti na druhu sondy a použité přijímací jednotce. Může být až 10 m, proto jsou vhodné pro malé a středně velké stroje. Kdyby rozsah přenosu přesto nedostačoval, dají se pomocí speciálního modulu kombinovat 2 přijímací jednotky, každá na opačné straně pracovního prostoru, což zdvojnásobí oblast dosahu.



Obr. 2.5 Princip optického přenosu signálu.
[16]

- **Rádiový přenos** – Je vhodný pro stroje, kde příliš velký pracovní prostor nebo naopak příliš uzavřený prostor nedovoluje infračervený přenos. Podobně jako u infračerveného přenosu jsou zde rozmístěny přijímací a vysílací moduly rovnoměrně po obvodu sondy. Rádiový signál má ale tu výhodu, že pronikne i materiálem od kterého by se infračervený signál odrazil. Tzn. že přijímací jednotka nemusí být uvnitř pracovního prostoru stroje ale kdekoliv. Pracovní oblast má tvar koule o poloměru 15 m, který ale se stoupajícím počtem překážek výrazně klesá. Signál má frekvenci 20 kHz. Pracuje tedy podobně jako Bluetooth

nebo Wi-Fi. Pokud je signál rušený automaticky se přeladí na nejbližší volnou frekvenci (systém FHSS). Sondy s tímto druhem přenosu se vyznačují vyšší cenou přijímací jednotky než sondy s infračerveným přenosem. Jsou vhodné pro stroje s velkým pracovním prostorem. Je možné najít i provedení, kde je radiový signál speciálně upraven na průnik materiálem a jeho frekvence je proto mnohem vyšší např. 453 MHz. Tímto druhem radiového přenosu se zabývá firma M&H.



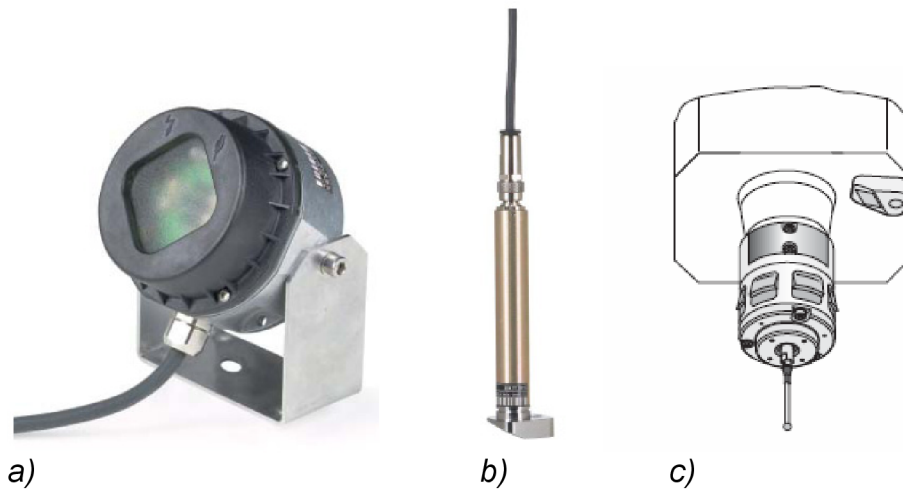
Obr. 2.6 Princip rádiového přenosu.
[upraveno 13]

III. Přijímače/vysílače signálu:

Přijímače musí být namontovány tak, aby se v celé dráze pojezdu stroje nacházely v rozsahu vyzařování dané sondy. Přijímací jednotky jsou buď k montáži přímo do vřeteníku nebo pro montáž v pracovním prostoru stroje.

Přijímací jednotky pro montáž přímo do vřeteníku mají výhodu v tom, že se pohybují s celým vřetenem po pracovním prostoru stroje. Tím je jednoznačně zajištěn vizuální kontakt se sondou i u strojů s velkým rozsahem pojezdů (až na stroje s dlouhou výsuvnou pinolou nebo smýkadlem a stroje s výměnnými hlavami). Jejich použití se ale musí zohlednit už při konstrukci vřetená. Jelikož je sonda u tohoto provedení oproti přijímací jednotce stále našikmo, je vhodné použít sondu vysílající pod úhlem např. $+30^\circ$. Existuje i provedení pro dodatečnou vestavbu do pracovního prostoru stroje.

Tyto přijímače mohou být vystaveny působení chladicí emulze. Montují se pomocí držáku a několika šroubů, které jsou součástí příslušenství. Nevýhoda tohoto provedení je v tom, že pracovní prostor stroje musí být omezen, aby nedošlo vlivem kolize s některou částí stroje ke zničení přijímacího zařízení.



Obr. 2.7 Příjímače obrobkových sond s infračerveným přenosem:
a) pro vestavbu do pracovního prostoru;
b),c) pro přímou vestavbu do vřetena stroje. [6]

Signály se kterými sonda pracuje jsou následující 4:


Start signálem se sonda aktivuje. Jako zpětné hlášení o provozu sondy se zobrazuje *pohotovostní signál*. Když dojde k vychýlení dotkového hrotu, tak se vygeneruje *spínací signál*. Pokud hodnota baterie klesne pod danou úroveň, většinou pod 10%, (sonda sama rozpozná druh použité baterie) je vydán *varovný signál*. To platí i u napájení pomocí vzduchové turbíny, kde se tímto signálem aktivuje přívod stlačeného vzduchu pro nabíjení kondenzátorů. Sestupnou hranou start signálu se sonda opět vypne. Některé druhy řídicích systémů používají všechny signály, jiným stačí pouze 3 a to pohotovostní, spínací a varovný signál (v případě že sonda má odstředivé čidlo a zapíná/vypíná se roztočením vřetene, nebo má na nástrojovém držáku spínač a zapíná se vložením do vřetene, popř. časovačem). [6, 15]

2.1.3 Vyměnitelné doteky a nástrojové držáky [6, 7, 9]

Doteky:

Dotek je součástí měřicího systému, která přenáší kontakt z měřeného dílce na sondu. Způsobuje sepnutí sensorického mechanismu sondy. Proto je rozhodujícím faktorem pro přesnost dokonalá kulovitost měřicí kuličky (např. Renishaw kulovitost 0,008 μm). Délka dotyku je většinou dána tvarem snímaného prvku. Délka dotkového hrotu a jeho materiál také výrazně ovlivňují spínací charakteristiky a tím i výslednou přesnost. Většina klasických dotkových konfigurací zajišťuje přesnost $\pm 5 \mu\text{m}$ a lepší.

Tyto doteky se vyrábějí v širokém spektru, podle potřeby jednotlivých měřicích operací. Nejčastěji se používají přímé, hvězdicové a diskové. Přesto pro některé aplikace jako je např. měření otvorů v tenkém plechu se musí použít nástavce speciální (s hrotem, válcové atd.).

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 20
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Zásady pro co nejlepší přesnost sejmutí bodu kontaktu:

- Použit co nejmenší možnou délku doteku – dlouhý dotek se více ohýbá a dochází u něj k větším výchybkám, tím je přesnost měření nižší a proto je vhodné volit co nejkratší dotek. V případě potřeby delšího doteku se dá snadno prodloužit pomocí speciálních nástavců
- minimální počet spojů – spoje doteku a nástavce jsou možným zdrojem deformací a bodů ohybu a mají negativní vliv na přesnost snímání
- maximální průměr koncové kuličky doteku – u velkého průměru se maximalizuje vzdálenost mezi kuličkou a stopkou doteku. Čím větší tato mezera je, tím menší je možnost chybných sepnutí způsobených kolizí stopky sondy s hranou měřené součásti. Tím druhým důvodem je, že větší kulička snižuje vliv jakosti povrchu měřeného dílce. To platí především pro ustavování hrubě opracovaných polotovarů. [7]

Materiály kuličky doteku:

Při kontaktním skenování se rozměry dílce zaznamenávají během klouzání kuličky doteku po povrchu nejrůznějších materiálů. Není-li zajištěno přiměřené mazání, může vlivem nanášení materiálu ze snímaného povrchu nebo vlivem opotřebení docházet k tvarovým změnám kuličky doteku. To může způsobit chyby v naměřených datech. Rozsah těchto změn závisí na vlastnostech materiálu kuličky i snímaného povrchu, na přitlačné síle, snímané vzdálenosti a rozložení kontaktu na povrchu kuličky.

Doposud nebyl pro kuličku doteku nalezen jednotný materiál, který by odolával účinkům u všech obvyklých strojírenských aplikací [7]. Nejčastěji používané materiály kuličky jsou rubín, nitrid křemíku a oxid zirkoničitý.

- **Rubín:** Tento materiál je vhodný k většině měřících aplikací. Syntetický rubín je oxid hlinitý – Al_2O_3 s čistotou 99%. Je velmi tvrdý, odolný oproti opotřebení otěrem a má nízkou hmotnost.
Existují ale 2 případy kdy není vhodné použít kuličku z rubínu. A to při snímání hliníkových a litinových obrobků. Protože rubín obsahuje velkou část hliníku dochází při kontaktu z hliníkovým povrchem k jevu známému jako adhezní otěr (hliník ulpívá na kuličce a nabaluje se na ni). To má za následek předčasné sepnutí a dojde k chybě měření. V tomto případě je vhodné použít nitrid křemíku. Při měření litinových obrobků dochází k rychlejšímu opotřebení kuličky. Proto je vhodné použít jiný materiál s tvrdším povrchem. Pro tyto aplikace je vhodný oxid zirkoničitý.
- **Nitrid křemíku:** Mezi nitridem křemíku a hliníkem k vzájemnému působení nedochází, takže u této kombinace adhezní otěr nevzniká. Je to materiál podobných mechanických vlastností jako syntetický rubín a dá se dobře brousit i leštit. Avšak při kontaktu s ocelovými povrchy vykazuje značnou míru opotřebení, proto je jeho ideální aplikací pouze měření obrobků z hliníku.
- **Oxid zirkoničitý:** Jde o keramický materiál, který se charakteristikou tvrdosti blíží syntetickému rubínu. Díky vlastnostem povrchu je ideálním



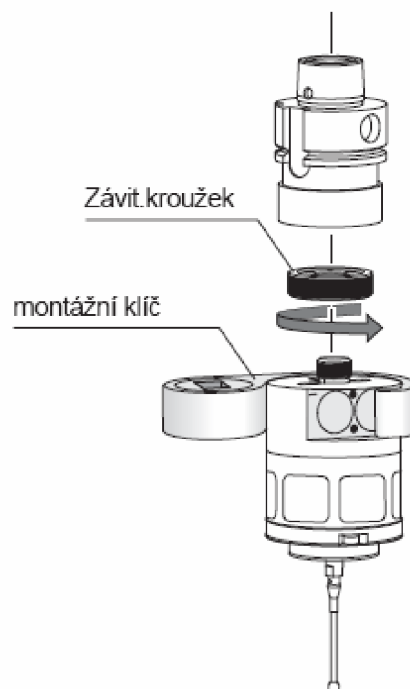
materiálem pro kontakt s agresivními povrchy litinových součástí v cyklu těžkého provozu.

Nejčastějšími **materiály dřívku** doteku bývají ocel (cementovaná a kalená nebo vysoce legovaná), karbid wolframu, keramika. U některých velmi přesných sond se používá materiálů speciálních, které vynikají nízkou hmotností, dobrou schopností tlumení vibrací a minimální teplotní roztažností. Příkladem může být materiál Renishaw GF – uhlíková vlákna kombinovaná se speciálními pryskyřičnými matricemi.

Nástrojové držáky:

Sondy se upínají přímo do vřetena stroje. Dodávají se s různými nástrojovými držáky (např. HSK, SK, ISO atd.), při objednání se zadá pouze potřebný typ. Pokud je na stroji přesto jiný nástrojový držák, je zde možnost upínat sondu pomocí normalizovaných válcových stopek v běžných kleštinových upínacích pouzdrech (např. Weldonův upínací nástrojový držák).

Mohou být také dodány bez upínací stopky v univerzálním provedení. Nástrojový držák se pak připevňuje na závit (M30, M12, atd.), na který mohou být upnuty různé typy těchto držáků. Před vlastním upevněním je však potřeba provést na držáku určité konstrukční úpravy tak, aby dokonale lícoval se sondou. Tyto úpravy jsou podrobně popsány v dokumentaci jednotlivých sond.



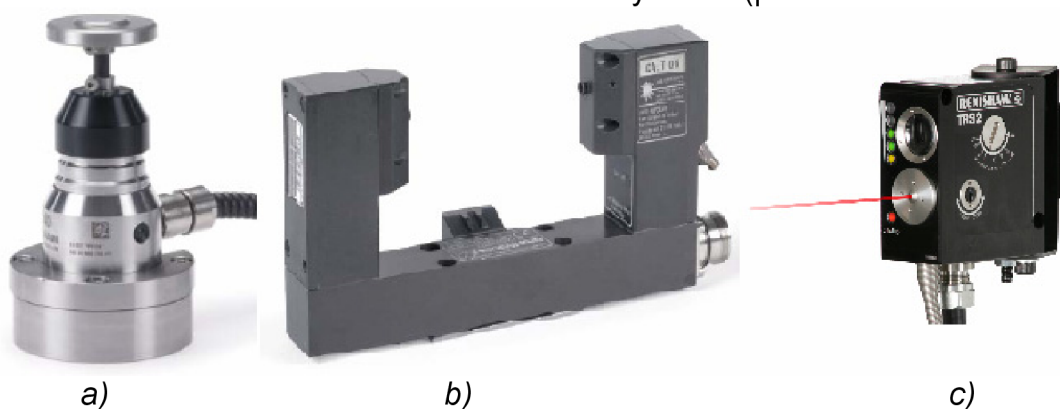
Obr. 2.8: Univerzální provedení připojování nástrojového držáku pomocí závitového kroužku.[6]

2.2 Sondy pro kontrolu nástrojů

Stav řezného nástroje (jeho opotřebení nebo poškození) se vždy promítne do kvality obrábění a proto je potřeba u každé přesné výroby zavést rozměrové korekce opotřebení nástroje, popř. zkontrolovat, zda nástroj není poškozen. Nástrojové sondy umožňují automatický výpočet opotřebení s následnou korekcí rozměrů nástroje a kontrolu poškození. Popř. korekci tepelných dilatací u nástrojů s větším průměrem. Automatické měření nástroje má význam především v bezobslužných provozech, kde je cyklická kontrola rozměrů nástroje nezbytná pro dobrou kvalitu výroby s minimálními náklady na doobrobení chybných kusů. Získané hodnoty měření uloží CNC řízení do tabulky nástrojů pro další zpracování v NC programech. Např. pokud jsou odchylky nástroje mimo zadanou toleranci nebo byla-li překročena sledovaná životnost, může řízení nástroj zablokovat a vyměnit automaticky za sesterský. Odpadají tedy i náklady na seřizovače nástrojů. V porovnání se seřizováním nástrojů jinde např. na specializovaném pracovišti a ruční korekcí v tabulce přímo na panelu obráběcího stroje zde nevzniká riziko špatného zanesení údajů a je mnohonásobně rychlejší (průměrná doba měření je kolem 1 až 4 s). Tyto sondy se vyrábějí v drtivé většině v provedení s kabelem, protože jsou uloženy na stojanu vedle pracovního stolu. Přesto některé kontaktní nástrojové sondy pro menší a střední stroje využívají přenos optický a jsou upnuty přímo na pracovním stole. Při upnutí na pracovní stůl musíme omezit pracovní prostor stroje tak, aby nedošlo ke kolizi některé z pohyblivých částí stroje se sondou a jejímu zničení. [7]

K měření nástrojů se používá třech základních typů sond:

- Dotykové sondy pro kontaktní měření nástroje
- laserové sondy k proměření a kontrole poškození nástroje
- laserové sondy pouze pro detekci poškození nástrojů
- kombinace kontaktního a laserového systému (pouze Blum-Novotest).



Obr. 2.9 Nástrojové sondy:

a) Kontaktní sonda Heidenhain TT 140; [6]

b) laserová sonda pro kontrolu poškození a měření rozměrů nástroje Heidenhain TL Micro 220; [6]

c) laserová sonda pro detekci poškozeného nástroje Renishaw TRS2. [7]

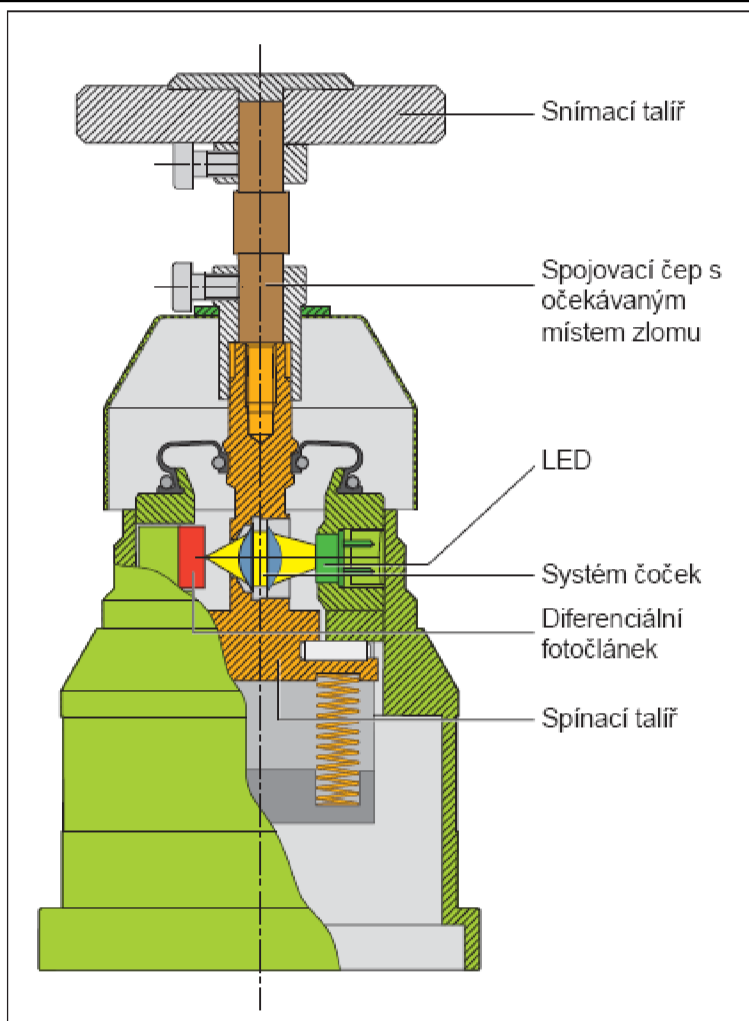
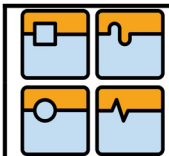


2.2.1 Kontaktní měření nástroje [2, 6, 7, 8]

3-D nástrojové sondy jsou určeny pouze k proměření nástrojů, nikoliv k detekci poškození. Určité formy poškození nástroje lze přesto registrovat i pomocí měření. Např. pokud se ulomí špička vrtáku, tak sonda po proměření nástroj zablokuje, protože je naměřená rozměrová odchylka (průměru a nebo délky) příliš velká. Sonda měří průměr a délku nástroje při stojícím nebo rotujícím vřetenu. Snímací talíř (dotek) je vyroben z kalené oceli a v případě potřeby jde jednoduše vyměnit. Nosný čep talíře je opatřen 2 vruby tzv. očekávaným místem zlomu, tím je ochráněna vlastní sensorová jednotka v případě chyby obsluhy. Mohou se použít i pro měření nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami. Sondy jsou však méně vhodné pro některé druhy materiálů destiček. Moderní rezné materiály jsou totiž velmi tvrdé, aby se nástroj rychle neotupil, ale zároveň i velice křehké. Při kontaktu s kalenou ocelí prasknou. Také při měření nástrojů velmi malého průměru (menší než 4 mm) může být hodnota délky chybně odečtena vlivem průhybu nástroje. Někteří výrobci limitují použití sondy maximální odvodovou rychlostí, při které je sonda schopná snímat, jiní otáčkami a max. průměrem nástroje (max. použitelné otáčky 1000 min^{-1}). To znamená, že se nehodí k měření nástrojů o velkém průměru. Resp. nástroj nejde proměřit při obráběcích otáčkách, ale pouze stojící nebo při takových otáčkách, jaké mu dovolí maximální obvodová rychlost, při které sonda dokáže snímat.

Princip funkce:

3-D nástrojová sonda funguje podobně jako sondy obrobkové na bázi některého ze senzoru (optický, odporový, tlakový atd). Např. firma Haidenhain používá u těchto sond optického senzoru. Optický senzor pracuje bezkontaktně, tudíž se na něm neprojeví mechanické opotřebení ani po velmi vysokém počtu měřících cyklů. Spínací signál vzniká v diferenciálním fotočlánku, který zachycuje paprsky vycházející z LED diody. Paprsky jsou vychýleny a zaostřeny do jediného bodu soustavou čoček pevně spojenou se snímacím talířem uloženým v třibodovém ložisku, které zajišťuje fyzikálně ideální klidovou polohu. Při vychýlení talíře (dotyku) z klidové polohy dojde k vygenerování spínacího signálu a aktuální hodnota polohy os se uloží do řízení, kde se dopočítají hodnoty korekcí nástroje.



Obr. 2.10 Princip funkce 3-D nástrojových sond Heidenhain TT. [6]

2.2.2 Laserové měření a kontrola poškození nástroje [1, 4, 6]

Laserové sondy sloužící pro měření rozměrů nástroje a kontrolu poškození nabízejí obdobné možnosti měření jako sondy dotykové tzn. měří délku a průměr nástroje. Mají ale oproti dotykovým sondám tu výhodu se měření provádí bezkontaktně, takže nehrozí žádné mechanické ovlivnění povrchu nástroje. Toho se využívá především při měření křehkých vyměnitelných břitových destiček. Také max. obvodová rychlost nástroje během snímání není limitována. Takže bezkontaktně lze nástroj měřit i větší průměry nástroje vždy při skutečných obráběcích otáčkách, kdy se projeví některé geometrické chyby stroje související s pohybem vřetene (čelní a obvodové házení). S jejich pomocí lze snímat libovolný tvar kontury nástroje a tedy i jakékoliv jeho poškození. Předpokládá se totiž, že pokud je nástroj v pořádku, tak bude paprsek zastíněný. Pokud paprsek laseru projde, daná část nástroje chybí - je tedy poškozený.

Systém může být buďto pevný (Renishaw NC4F) nebo dělený (Renishaw NC4S). Slouží k měření a kontrole nástrojů od průměru 0,03 mm (bez ovlivnění měřené hodnoty průhybem nástroje). Dělený systém lze uložit po stranách pracovního stolu stroje, tak aby procházel pracovním prostorem a to až do vzdálenosti 5 m. Dělený systém je náročnější na nastavení, protože laser a přijímač se musí dokonale vyrovnat, což se ne vždy podaří. Díky tomu mají fixní

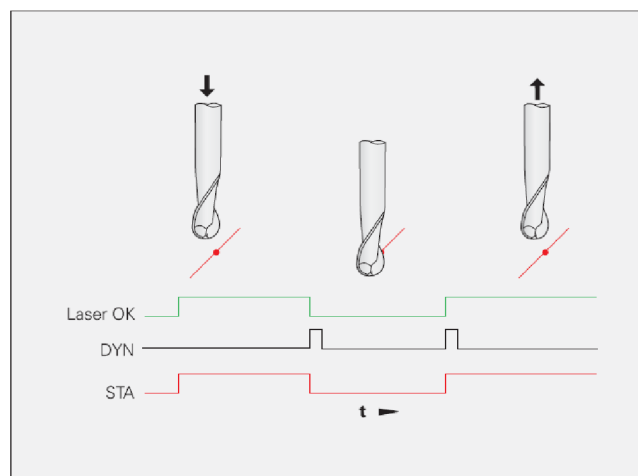


systemy lepší přesnost. Reprodukovatelnost měření se pohybuje kolem $\pm 1 \mu\text{m}$ (2σ) i při rozestupu jednotek 1 m.


Princip funkce:

Laserová měřidla nástrojů fungují jako vysoce přesná laserová závora. Přijímač umístěný naproti laserovému paprsku detekuje každé jeho přerušení. Při každé změně stavu (přerušení / obnovení paprsku) vytvoří integrovaná elektronika spínací impulzy. Tento druh sond většinou pracuje se třemi druhy signálů. Těmi jsou signál pro kontrolu stavu laseru LASER OK, dynamický signál označovaný DYN a statický signál STA.

Signál Laser OK slouží pouze ke kontrole funkčnosti zařízení a nabyde hodnoty 1 pokud na čidlo sondy dopadá alespoň 75% z max. intenzity laseru. Na obr. 12 je princip funkce zřetelnější. Jde o měření délky vrtáku. Než nástroj paprsek přeruší mají jednotlivé signály hodnoty: DYN 0, STA 1. Ve chvíli přerušení (pokud intenzita laseru poklesne pod 50%) vygeneruje DYN jednotkový impulz definovaného trvání (20 ms) a signál STA nabyde hodnoty 0. Při opětovném obnovení se opakuje jednotkový impulz DYN, současně signál STA nabyde hodnotu 1. Tyto signály jsou odeslány do NC řízení. DYN slouží tedy jako spínací signál. Současně se známou rychlostí měření (a najíždění vždy kolmo na paprsek a doprostřed laseru v obou osách) lze skutečný dopočítat průměr nástroje.



Obr. 2.11 Průběhy signálů generovaných laserovou nástrojovou sondou při měření délky nástroje. [6]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 26
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

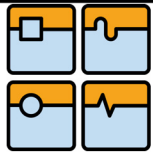
2.2.3 Detekce poškození nástroje [7, 12]

Někdy se z ekonomických důvodů vyplatí použít sondu pouze pro detekci poškození nástroje. To platí hlavně pro stroje, u kterých není prvořadá přesnost výroby. Zničený nástroj ale většinou poškodí obrobek, proto je třeba nástroj ihned vyměnit aby např. nenastala situace, kdy si obsluha stroje nevšimne chyby nástroje a stroj vyrábí dál zmetky. Hodí se např. na vyvrtávací stroje, kde se používá většinou několik vrtáků pro různé průměry po sobě a sonda kontroluje vrták před jeho výměnou. Tím se předejde tomu, že do ulomeného zbytku vrtáku najede další nástroj, který by se také zničil. Je zde i druhý důvod a tím je, že k měření nástroje není potřeba nástrojová sonda, protože ke korekci opotřebení nástroje se mohou použít hodnoty získané měřením obrobku pomocí 3-D dotykové sondy. Korekce nástroje jsou tedy zajištěny z nepřímého měření a zbývá pouze kontrola poškození nástroje. Lze je nainstalovat mimo pracovní prostor stroje, kde nehrozí žádná kolize s některou z pohyblivých se částí stroje.

Princip funkce:

Tento typ sondy funguje na principu zachycování odrazu laseru od nástroje. Je tedy složena pouze z jedné části, vybavené jak laserem, tak i přijímací jednotkou. Přijímací jednotka registruje odrazy laseru od nástroje při konstantních otáčkách (1000 min^{-1}) a je chráněná ofukováním proudem vzduchu, aby nedošlo k jeho zastínění chladicí kapalinou. Každý nástroj má svůj charakteristický vzor odrazů. Pokud se vzor změní (např. vlivem odlomení některého z břitů), nástroj je poškozený. Jejich výhodou je v jednoduchosti, a rychlosti (doba kontroly obyčejného nástroje je 1 s, ale u složitějších kontur se doba kontroly variabilně zvyšuje). Sonda detekuje pouze odrazové vzory rotujících částí, nedojde tedy ke zkreslení kontroly odrazem od rozstříkujících se kapek chladicí kapaliny ani od obrobených třísek.

Příkladem takového zařízení může být sonda Renishaw TRS2 (obr. 2.9 c), je to vysokorychlostní detekce poškození nástroje (měřicí cyklus je kratší než 1s), která rozpozná i jednobřítý nástroj od průměru 0,02 mm. Vzdálenost mezi nástrojem a sondou nutná k provedení měření se pohybuje v rozsahu 0,3 až 2 m.



2.3 Způsoby řízení obrobkových a nástrojových sond

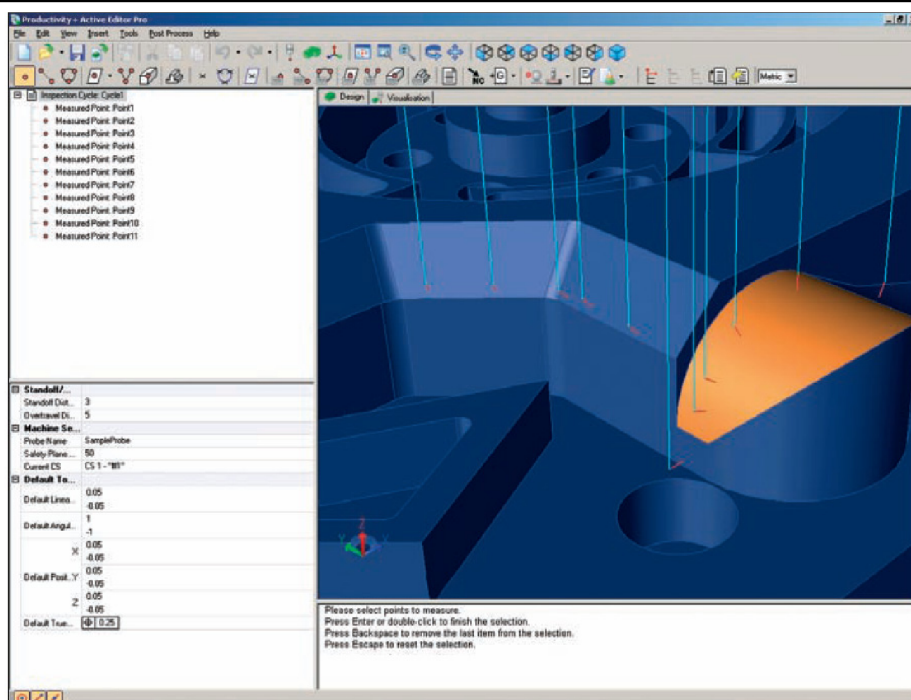
Nejčastěji používaným způsobem je zapojení přímo do řídicího systému stroje tzv. letmo (např. systémy Siemens Sinumerik 840D, Heidenhain iNC530 atd.) Tento způsob řízení má výhodu v tom, že se signál sond zpracovává přímo v řídicím systému a doba odezvy na signál sondy je tedy minimální. Není také potřeba žádného dodatečného softwaru sond protože ŘS sám disponuje řadou měřících cyklů. Cykly jsou zobecněné podprogramy, určené k vyřešení dané oblasti měřících úkonů. Pomocí vstupních parametrů se pak přizpůsobují konkrétní úloze. Existují měřicí, kalibrační a pomocné (výpočtové, protokolovací atd.) cykly. Např. cyklus k proměření šířky můstku – sonda očekává najetí do 2 bodů, na každé straně jeden. Sondy mohou pracovat buď v ručním režimu nebo v režimu automatickém.

U ručního měření se pomocí tlačítek na ovládacím panelu stroje zvolí požadovaný druh měření, např. vyrovnání polotovaru natočením souřadného systému stroje. Poté se najede poblíž požadovaného místa měření (± 30 mm) a zmáčkne se tlačítko směru, ve kterém se má měřit (např. X+ nebo X-). Výsledky měření lze jednoduše vypsát ve formě protokolu o měření přes rozhraní NC řízení.

Při automatickém měření se postupuje jako u programování CNC strojů pomocí klasických NC kódů. Tzn. na začátku programu (před obráběním) se přivolá požadovaný cyklus, u kterého se zadají potřebné parametry. Poté se provede měření. Až je měření hotovo, spustí se samotný obráběcí program (ve formě přivolaného podprogramu). U automatického měření se musí obrobek ustavit s přednastavenou tolerancí (např. $\pm 5^\circ$ vůči hraně stolu), aby sonda nenajížděla zbytečně z velké bezpečnostní vzdálenosti. Což by zvýšilo časy ustavování.

Dalším způsobem je programování pomocí softwaru sondy, dodaného od výrobce. Tento software slouží k aplikaci nejrůznějších měřících cyklů nebo k tvorbě vlastních měřících cyklů, mimo obráběcí stroj na PC. K tomu se použije importovaného CAD modelu (IGES, STEP, atd.) na kterém se vytvoří body, kde má být měření provedeno. Je zde i možnost kontroly kolize sondy s obrobkem nebo jinou částí stroje (verifikace), aby nedošlo k poškození sondy. Hotový měřicí program se pomocí postprocesoru převede na NC kód konkrétního stroje, který obsahuje všechny potřebné cykly. Příkladem může být software obrobkových sond Productivity™ Active Editor Pro od firmy Renishaw.

Při kontaktním skenování povrchu dílce se používá taktéž specializovaného softwaru, který vygeneruje CAD model na základě snímání velkého množství bodů s malým rozestupem nebo soustavného klouzání po povrchu. Příkladem digitalizačního softwaru může být 3D Shape Inspektor od firmy Marposs. [3, 8, 10]



Obr. 2.12 Software obrobkových sond Productivity™ ActiveEditorPro od firmy Renishaw. [7]

2.4 Přesnost, reprodukovatelnost a rychlost snímání

Přesnost snímání sondy – Jako přesnost snímání je udávána maximální hodnota z odchylek, které jsou zjištěny při měření zkušebního vzorku z *různých směrů* (při okolní teplotě 20 °C). Na přesnost snímání má vliv především typ použitého senzoru v sondě. Dále pak délka a materiál doteku, ale i poloměr snímací kuličky. Velký poloměr totiž snižuje vliv zhoršené jakosti povrchu na přesnost snímání. Také rychlost posuvu při snímání výrazně ovlivňuje přesnost měření.

Celková dosažitelná přesnost závisí na:

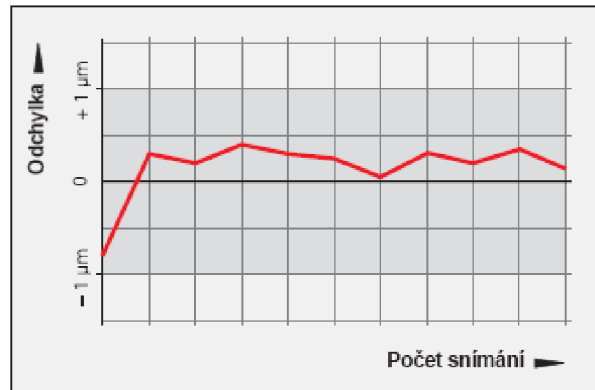
- Přesnosti stroje
- přesnosti sondy a použitém dotyku (lepší než $\pm 5 \mu\text{m}$)
- rozlišovací schopnosti a druhu použitého odměřovacího systému (zda jde o absolutní nebo o inkrementální měřící systém). [8]

Reprodukovatelnost snímání sondy – Reprodukovatelnost snímání (z anglického repeatability) je zde myšlena jako odchylka, ke které dojde po opakovaném měření zkušebního vzorku z *jednoho směru* (při okolní teplotě 20°C), při stejné orientaci vřetena (aniž by se s ním nějak pohlo). Největší hodnota z těchto odchylek je pak hodnotou reprodukovatelnosti.

Obvyklá reprodukovatelnost těchto sond se pohybuje kolem 1 μm . Závisí na rychlosti snímání (větší rychlost = horší hodnota reprodukovatelnosti). Také posouzení ze statistického hlediska může ovlivnit konečnou hodnotu reprodukovatelnosti sondy. Současně nejpoužívanějším pravidlem pro statistické zpracování výsledků měření je ze strany výrobců, pravidlo 2σ a předpokládané rozdělení je normální (Gaussovo) – viz. kap. 4.5.



Většina výrobců neudává v základních parametrech pro porovnání přesnosti sondy, ale její reprodukovatelnost při konkrétní rychlosti snímání, pro určitou délku doteku. Např. RMP60: $1 \mu\text{m}$ (2σ) při rychlosti $490 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a délce doteku 50 mm.



Obr. 2.13 Typický průběh reprodukovatelnosti snímání sond Heidenhain TS2xx/4xx/6xx: opakované snímání z jednoho směru při definované orientaci vřetena. [6]

Rychlost snímání – Mechanicky přípustná rychlost je uvedena v technických parametrech přístroje. Protože je rychlost snímání jeden z libovolně nastavitelných parametrů, je vhodné volit ji s ohledem na požadovanou přesnost. Všechny obrobkové sondy pracují přesněji při malých rychlostech snímání ($\sim 500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$).

Pokud by se přesto požadovala maximální možná rychlost snímání, je nutno přihlídnout k maximálnímu přípustnému vychýlení hrotu do všech směrů. To obvykle bývá 5 mm v ose Z a $\pm 9^\circ$ v osách X a Y u menších sond nebo 11 mm v ose Z a $\pm 18^\circ$ v osách X a Y u sond robustnějšího provedení. Během této dráhy se musí pohyb sondy zastavit, aby nedošlo k ulomení dotyku. Celková brzdná dráha, kterou sonda urazí po kontaktu s obrobkem se dá vypočítat takto:

$$s = v \cdot t + \frac{v^2}{2b} + D_s \quad (2.1)$$

Kde: s – dráha [mm], kterou sonda po sepnutí urazí než dojde k zastavení vřetena (nebo pohybu některé z os stroje, např. posuvného stolu)
 v – rychlost snímání [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
 t – doba odezvy ř.s. na signál sondy [s]
 b – brzdné zrychlení [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$]
 D_s – maximální chyba polohovacího ústrojí stroje [mm].

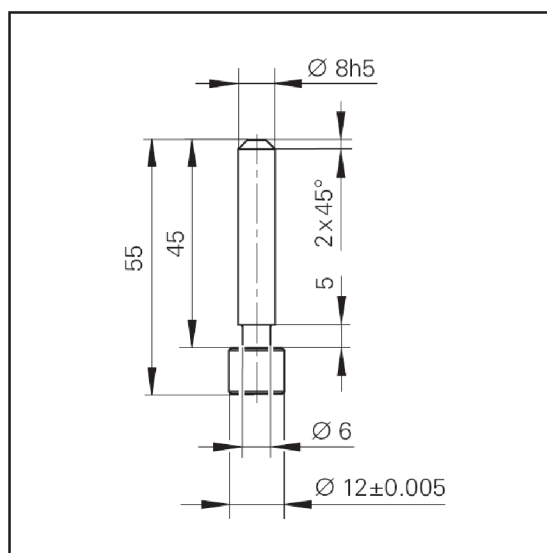
V průběhu samotného snímání se stroj musí pohybovat s nulovým zrychlením a nesmí se změnit směr pojezdu, jinak se rozhodí kalibrace sondy a dojde k chybě měření. V případě strojů s pomalejším řízením se každý bod snímá dvakrát za sebou, aby nedošlo k chybnému zaznamenání údaje vlivem zpožděné reakce řídicího systému. Vícenásobné snímání se může také použít při potřebě přesnějšího výsledku měření. Za finální hodnotu je pak použit aritmetický průměr z těchto měření.

Doba měření je tedy dána hlavně rozestupem snímaných bodů (velikostí obrobku), rychlostí NC řízení, počtem měření a chováním stroje při brzdění. [6,8]

2.5 Kalibrace sond

Kalibrace laserových a 3- D dotkových nástrojových sond:

Před začátkem měření nástrojů musí být měřidlo zkalibrováno. To znamená, že musí být zjištěna přesná poloha spínacích bodů vztahená k souřadnému systému stroje. K tomu slouží referenční kalibrační nástroj, který se dodává jako zvláštní příslušenství. Kalibrační nástroj má tvar válcového čepu s odsazeným kontrolním průměrem pro měření v kladném a záporném směru osy Z. Kalibruje se délka a průměr čepu. Při jednodušších aplikacích je možné použít broušený válcový čep viz. obrázek 13. Pro kalibrační měření je potřebné zajistit co nejklidnější průběh (žádné vibrace od okolních strojů, okolní teplota 20°C, atd.). [6, 15]



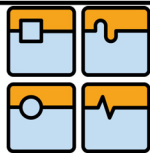
Obr. 2.14 Zjednodušený kalibrační čep. [6]

Kalibrace 3-D dotkových sond pro měření obrobku:

Dotková sondy se musí kalibrovat v případě:

- Uvedení do provozu
- zlomení dotkového hrotu
- výměny dotkového hrotu
- změny posuvu při snímání
- nepravidelností způsobených zahříváním stroje
- a také pravidelně během provozu, zhruba jednou za měsíc. [8]

U 3-D dotkových sond k tomu slouží referenční obrobek prstencového tvaru (kalibrický kroužek), se známým průměrem a délkou, ke kterému sonda najede a změří jeho vnitřní průměr a délku. Tím je kalibrace dokončena.



3. VÝBĚR VHODNÝCH SOND K JEDNOTLIVÝM STROJŮM

V této kapitole se nejdříve provede analýza pracovních prostorů jednotlivých univerzálních strojů z produkce TOS Kuřim. Poté k nim budou vybrány vhodné obrobkové sondy. Druh použité nástrojové sondy záleží pouze na tom, jaké nástroje používá zákazník.

3.1 Výběr vhodných sond

3.1.1 Obrobkové sondy

U všech typů strojů je možné použít obrobkovou sondu. Typ záleží pouze na požadované délce dosahu sondy, která je dána rozsahem pracovních posuvů daného stroje. Při vhodném umístění přijímače na některou část, pohybující se s vřetenem (na portál, na posuvný stojan atd.) se zajistí dosah v nejdelší ose stroje.

Samotné sondy se zvolí podle požadované přesnosti měření s ohledem na přesnost polohování stroje.

V následujících tabulkách jsou uvedeny obrobkové sondy, které by byly vhodné pro použití na strojích z produkce TOS Kuřim. V závorce pod danou sondou je vždy uvedena hodnota její reprodukovatelnosti měření (2σ) pro srovnání.

Rádiové sondy pro měření obrobku			
Renishaw	Marposs	Blum-Novotest	M&H
Vysoká přesnost: RMP 600 + RMI (0,25 μm) Normální přesnost: RMP 60 + RMI (1 μm)	Vysoká přesnost: Mida T36 + WRS (0,5 μm) Normální přesnost: Mida TT60 + WRS (1 μm)	Normální přesnost: TC60 + RC66 (1 μm)	Normální přesnost: 21.10–MULTI + 95.10–SCS (1 μm)
Dosah 15 m			Dosah 10m

Tab. 3.1 Rádiové sondy pro měření obrobku.

Optické sondy pro měření obrobku s delším dosahem (4 až 10 m)				
Renishaw	Marposs	Blum-Novotest	Heidenhain	M&H
Normální přesnost: OMP 60 + OMI 2 (1 μm)	Vysoká přesnost: Mida T36 + E83 nebo E83WA (0,5 μm) Normální přesnost: Mida TT60 + E83 nebo E83WA (1 μm)	Normální přesnost: TC50 + IC55 (verze WR + LR s delším dosahem); (1 μm)	Vysoká přesnost: TS 740 + SE 640 (0,25 μm) Normální přesnost: TS 640 + SE 640 (1 μm)	Normální přesnost: 25.10–HDR + 91.10–HDR (1 μm)
Dosah 6 m	Dosah 5 m	Dosah 5 m	Dosah 7 m	Dosah 4 až 10 m (volitelné)

Tab. 3.2 Optické sondy k měření obrobku s delším dosahem.

Optické sondy s kratším dosahem			
Renishaw	Blum-Novotest	Heidenhain	M&H
Vysoká přesnost: OMP 400 + OMI 2 (0,25 μm) Normální přesnost: OMP40 + OMI 2 (1 μm)	Normální přesnost: TC50 + IC55 (1 μm)	Normální přesnost: TS 440 nebo TS 444 + SE 640 (1 μm)	Normální přesnost: 32.00-MINI + 90.10-HDR nebo 40.01-TX/RX + 91.30-RX/TX (1 μm)
Dosah do 4 m			

Tab. 3.3 Optické sondy pro měření obrobku s kratším dosahem.

3.1.2 Bezkontaktní nástrojové sondy

Výběr nástrojových sond je pouze otázkou použitých nástrojů a záleží na konkrétním zákazníkovi. Jde především o maximální průměr nástroje, který se má měřit. V následujících tabulkách je uvedeno několik sond, které by byly vhodné pro měření a detekci poškození nástrojů na strojích z produkce TOS Kuřim. V závorce pod danou sondou je vždy uvedena hodnota její reprodukovatelnosti měření (2σ) pro srovnání.

Dělené laserové sondy pro měření nástroje a detekci poškození		
Renishaw	Marposs	Blum-Novotest
NC4S (±1μm)	Mida Laser 105 P nebo Mida Laser 75 P modular (±1μm)	Laser Control Micro Single NT nebo Laser Control Mini NT (±1μm)

Tab. 3.4 Dělené laserové sondy pro měření a kontrolu poškození nástroje.

Fixní laserové sondy pro měření nástroje a detekci poškození				
Renishaw	Marposs	Blum-Novotest	Heidenhain	M&H
NC4 F300 (±1μm)	Mida Laser 75 P stand alone (0,2 μm)	Laser Control Micro Compact NT (±1μm)	TL Micro 300 (±1μm)	35.60 LTS 160 (±0,2μm)

Tab. 3.5 Fixní laserové sondy pro měření a kontrolu poškození nástroje.

3.1.3 Dotykové nástrojové sondy

U strojů, kde se provádějí spíše vrtací operace, nebo se nepoužívají frézy s vyměnitelnými destičkami je možnost použití 3-D dotykových nástrojových sond. Jejich použití má ale oproti bezkontaktním měřícím systémům řadu nevýhod (viz. kap. 2.2). Nicméně jejich sortiment je větší a jejich cena je v porovnání s bezkontaktními systémy nižší. Tento typ sond není vhodný pro kontrolu nástrojů s křehkými vyměnitelnými břitovými destičkami. Reprodukovatelnost měření je podobná jako u laserových sond.

Dotykové sondy pro měření nástroje				
Renishaw	Marposs	Blum-Novotest	Heidenhain	M&H
OTS, TS27R nebo TS34	A90, T18, TS30, OTS30 nebo WRTS	Z-Nano IR, Z-Pico, TC 54-20, TC 76 nebo Z-3D	TT 140 nebo TT449	35.10-TS, 35.40-TS, 35.70-OTS nebo 38.70- RTS

Tab. 3.6 Dotykové nástrojové sondy pro měření a detekci poškození.

3.1.4 Sondy pouze pro kontrolu poškození nástroje

Tyto sondy lze použít na všech strojích, když se požaduje pouze detekce poškození nebo pokud se k rozměrovým korekcím nástroje použije obrobková sonda. Systémy TRS2 a TBD jsou složeny pouze z jedné části vybavené jak vysílačem laserového paprsku, tak i přijímačem odrazu. U systémů od firmy Blum-Novotest se jedná o stejné provedení jako dělené nebo fixní nástrojové sondy k měření i detekci poškození.

Laserové sondy k detekci poškození nástroje		
Renishaw	Marposs	Blum-Novotest
TRS2	TBD	Laser Control Micro Compact EC nebo dělený systém Laser Control Micro Single EC

Tab. 3.7 Laserové sondy pro kontrolu poškození nástroje.

3.2 Portálové CNC frézovací centra

Portálové stroje jsou největší stroje z produkce TOS Kuřim. To znamená, že použití obrobkových sond s infračerveným přenosem je omezeno, protože jejich pracovní prostor je příliš malý a tvarově nevhodný (úzký). A to i při upevnění přijímače na portál stroje, kdy se zajistí kompletní dosah v ose X. To by se dalo vyřešit kombinací 2 přijímacích jednotek, kde by každá obsloužila určitou část pracovního prostoru stroje. Ekonomičtější ale bude použití obrobkových sond s rádiovým přenosem. Vhodné typy sond jsou v následující tabulce.



Obr. 3.1 Portálové frézovací centrum FRUNQ 400 (starší označení je FRUQ 400). [5]

Písmeno Q ve zkratce znamená, že jde o stroj s automatickou výměnou nástrojů.

Osy: X- podélný zdvih posuvného stolu nebo portálu

Y- příčný zdvih

Z- zdvih ve směru osy vřetena

W- vertikální zdvih příčnicku (pouze u strojů s přestavitelným příčnickem), přičítá se k ose Z.

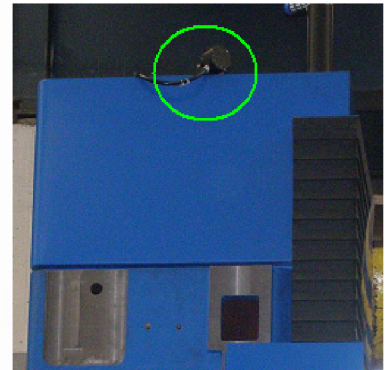
Portálová frézovací centra s posuvným portálem			
Typ stroje	Maximální pracovní zdvih [mm]	<p>Měření obrobku: Rádiové sondy – tab. 3.1 Alternativně optické sondy s delším dosahem a dvěma přijímači – tab. 3.2</p> <p>Měření a kontrola poškození nástroje: Dělené laserové sondy – tab. 3.4 Fixní laserové sondy – tab. 3.5 Detekce poškození nástroje – tab. 3.7</p>	
FRF (pevný příčnick)	X		23000
	Y		4300
	Z		1500
	W		-
FRUN A/B (pevný příčnick)	X		25000
	Y		6900
	Z		1500
	W		-
FRUF A/B/C (přestavitelný příčnick)	X		22000
	Y		8750
	Z		1500
	W		3300
Portálová frézovací centra s posuvným stolem			
FRPN A/B (pevný příčnick)	X	13500	
	Y	6800	
	Z	2000	
	W	-	
FRPF A/B (přestavitelný příčnick)	X	13500	
	Y	6800	
	Z	1500	
	W	2000	

Tab. 3.8 Obrobkové a nástrojové sondy vhodné pro použití na portálových frézovacích strojích TOS Kuřim.



3.3 CNC frézovací centra s posuvným stojanem

U obráběcích center s posuvným stojanem je vhodné upevnit přijímač obrobkové sondy nahoru na posuvný stojan (obrázek 3.2). Tím se zajistí kompletní dosah v ose X. Přesto nelze použít optické obrobkové sondy, protože obráběcí hlava mění pozici v ose Z a tím i úhel mezi vysílačem a přijímačem ve velkém rozsahu. To znamená, že by se optická sonda buď dostala z dosahu a nebo by mohlo dojít k zastínění signálu samotnou obráběcí hlavou. Pro tyto centra by bylo nejvhodnější použít sondy rádiové jako u portálových strojů.



Obr. 3.2 Frézovací centrum s posuvným stojanem FU, včetně umístění přijímače rádiové sondy RMI. [5], [22]

- Osy:
- X- podélný zdvih
 - Y- příčný zdvih
 - Z- vertikální zdvih
 - W- výsun pinoly (pouze u provedení s horizontální výsuvnou pinolou)

CNC centra s posuvným stojanem

Typ stroje	Maximální pracovní zdvih [mm]	
FU 150B	X	24000
	Y	1500
	Z	6000
	W	700
FU efektiv	X	20000
	Y	1500
	Z	2500
	W	800
FU	X	20000
	Y	1500
	Z	3000
	W	800
FFA	X	12200
	Y	1500
	Z	3000
	W	800
FFD	X	13200
	Y	1250
	Z	2000
	W	800

Měření obrobku:
Rádiové sondy – tab.3.1

Měření nástroje:
Dělené laserové sondy – tab. 3.4
Fixní laserové sondy – tab. 3.5
Dotykové sondy – tab. 3.6
Detekce poškození nástroje – tab. 3.7

Tab. 3.9 Obrobkové a nástrojové sondy vhodné CNC centra s posuvným stojanem.



3.4 Ložová CNC frézovací centra

Pro tento typ strojů je možné použít jak rádiové tak i optické sondy. Záleží pouze na velikosti pracovního prostoru, který má sonda obsloužit. Nejvýhodnější by u FSG, FSGA a FSDI bylo použití sond optických s umístěním přijímače do horního rohu, na vnitřní straně některého z bočních ochranných krytů. U menších rozměrových provedení stroje FS lze použít stejné optické sondy jako pro ostatní stroje. Oproti tomu u provedení větších, by byla vhodná sonda s přenosem rádiovým.



Obr. 3.3 Ložové frézovací centrum FSG. [5]

Osy:

- X – podélný posuv stolu
- Y – příčný posuv
- Z – svislý posuv

Ložová CNC obráběcí centra		
Typ stroje	Maximální pracovní zdvih [mm]	
FSG	X	2000
	Y	900
	Z	800
FSGA	X	2000
	Y	900
	Z	800
FSDI	X	1600
	Y	1250
	Z	1250
FS	X	5000
	Y	1250
	Z	2000

Měření obrobku:
Optické sondy s delším dosahem - tab. 3.2
Alternativně optické sondy s kratším dosahem – tab. 3.3

Měření a kontrola poškození nástroje:
Dělené laserové sondy - tab. 3.4
Fixní laserové sondy – tab. 3.5
Dotykové sondy – tab. 3.6
Detekce poškození nástroje – tab. 3.7

Měření obrobku:
Rádiové sondy – tab. 3.1
Alternativně optické sondy s delším dosahem – tab. 3.2
Měření a kontrola poškození nástroje:
Jako u ostatních.

Tab. 3.10 Obrobkové a nástrojové sondy vhodné pro ložová CNC obráběcí centra.

3.5 Horizontální CNC centra s pevným rámem

Pro horizontální obráběcí centra lze použít sondy optické s přijímačem umístěným na stropním krytu. Je zde ale opět možnost, že bude sonda zastíněna obráběcí hlavou a ztratí tak signál. Proto bych dal přednost raději sondám rádiovým.



Obr. 3.4 Horizontální frézovací centrum FOQ 150. [5]

Osy:

- X- přesuvný otočný stůl
- Y- příčný posuv
- Z - svislý posuv
- W - výsun pinoly

Horizontální CNC centra s pevným rámem			
Typ stroje	Maximální pracovní zdvih [mm]		Měření obrobku: Rádiové sondy – tab. 3.1 Alternativně optické sondy s delším dosahem – tab. 3.2 Měření nástroje: Dělené nástrojové sondy – tab. 3.4 Fixní laserové sondy – tab. 3.5 Dotykové sondy – tab. 3.6 Detekce poškození nástroje – tab. 3.7
	X	2600	
FOQ	Y	825	
	Z	1650	
	W	1250	

Tab. 3.11 Obrobkové a nástrojové sondy vhodné pro horizontální CNC centra s pevným rámem.



4. TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉHO MĚŘÍCIHO SYSTÉMU S VYHODNOCENÍM DOSAHOVANÉ PŘESNOSTI

Další část práce se bude zabývat testováním měřicího systému složeného z obrobkové sondy RMP 60 a nástrojové sondy NC4S od firmy Renishaw na stroji FRFQ 250.

Jednotlivé kapitoly budou zahrnovat:

- Zdůvodnění výběru sond pro daný stroj a jejich technickou specifikaci
- výčet úkonů, které je možné se sondami provádět
- popis způsobů řízení sond, včetně tvorby programů pro testování sondy
- vlastní testování sond
- porovnání struktury vedlejších výrobních časů při použití obrobkové sondy a bez ní
- ekonomické zhodnocení obrobkové sondy.

4.1 Zdůvodnění výběru sond a jejich technická specifikace

4.1.1 Specifikace stroje, na kterém se sondy použijí

Portálové CNC frézovací centrum FRFQ 250 se třemi obráběcími hlavami s možností výměny VO, VP14, VA.



Obr. 4.1 Portálové frézovací centrum FRFQ 300. [5]

Technické parametry stroje FRFQ 250:

Pracovní zdvih [mm]	X	4 000
	Y	3 300
	Z	1 100
Upínací plocha stolu [mm]	2 500 x 4 000	
Průchodnost mezi stojany [mm]	3 050	
Průchodnost mezi stolem a příčnickem [mm]	1 950	
Rozsah posuvů [mm·min ⁻¹]	X	1 – 15 000
	Y	1 – 15 000
	Z	1 – 15 000
Maximální zatížení stolu [kg·m ⁻²]	8000	
Max. otáčky vřetena [ot·min ⁻¹]	4000	
Zásobník nástrojů	R 40 – řetězový s kapacitou 40 ks	
Výkon hlavního pohonu [kW]	37	

Tab. 4.1 Technické parametry stroje FRFQ 250. [5]

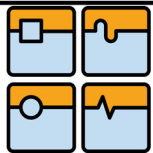
Provedení výměnných hlav:

Na stroji jsou použity 3 obráběcí hlavy s možností výměny (viz. obr. 4.2). Jejich použití se musí zohlednit pouze během kalibrace sondy. Kdy se sonda musí zkalibrovat s každou obráběcí hlavou zvlášť. Při výměně hlavy se automaticky načtou data získané z jednotlivých kalibrací.

Pozn.: Některé sondy (např. Blum), neumí data náležitě zpracovávat a při výměně obráběcí hlavy vyžadují novou kalibraci. Proto se nehodí pro stroje s možností výměny obráběcích hlav.



Obr. 4.2 Výměnné obráběcí hlavy. Zleva: přímá obráběcí hlava **VA**, úhlová obráběcí hlava **VP** a univerzální obráběcí hlava **VO**. [24]

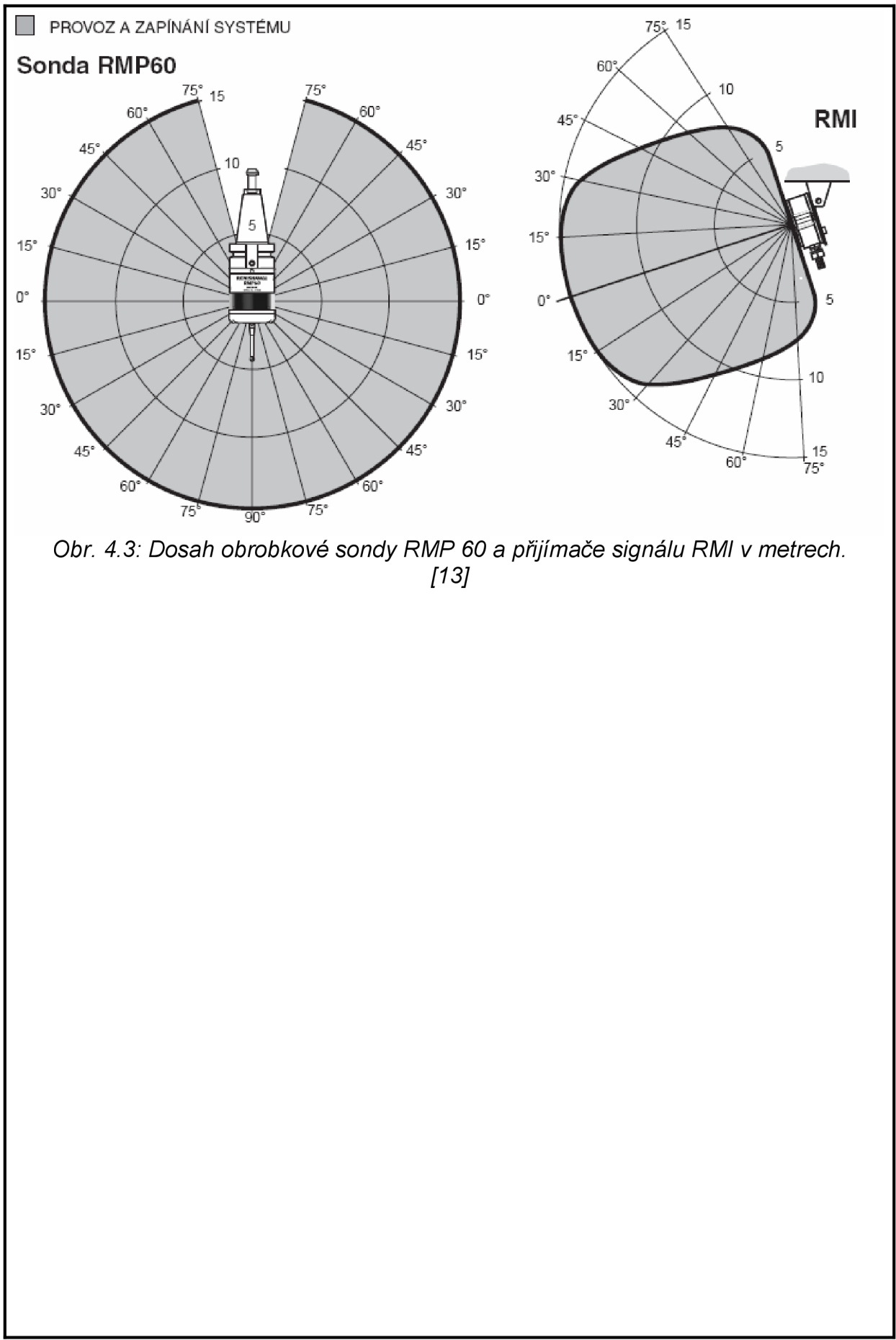


4.1.2 Volba obrobkové sondy

Při volbě obrobkové sondy měřicího systému mějme na paměti, že jde o stroj s velkým pracovním prostorem, proto zde bude nejvýhodnější použít sondy s rádiovým přenosem (rozsah signálu má tvar koule o poloměru 15m). Při použití infračerveného přenosu signálu by se z důvodu nízkého dosahu musela obrobková sonda kombinovat se dvěma přijímacími jednotkami, jejichž cena je vyšší. A při zastínění přímého optického kontaktu stěnou obrobku (např. při měření uvnitř skříňovitých součástí) by ztratila signál. Proto je zde zvolena sonda **Renishaw RMP 60** u které se vlivem zastínění jakýmkoli pevným tělesem dosah pouze zkrátí (signál projde i materiálem). Sonda má přímý dotek délky 100 mm s rubínovou kuličkou. Tento druh sondy se při správném umístění přijímače může použít pro libovolný typ portálového frézovacího stroje z produkce TOS Kuřim.

RMP 60 – Rádiová obrobková sonda	
Primární použití	Inspekční sonda pro obráběcí centra
Provozní dosah	100 mm až 15 m (obr. 4.10)
Směry snímání	Všesměrové $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$
Hmotnost (bez stopky) -s bateriemi	901 g
Spínací síla doteku při použití 50 mm doteku s nízkou spínací silou v daném směru	Výrobní nastavení X/Y 0.75 N Z 5.3 N
Spínací síla doteku při použití 50 mm doteku s vysokou spínací silou v daném směru	Výrobní nastavení X/Y 1.4 N Z 5.3 N
Max. otáčky	1000 ot·min ⁻¹
Zdvih doteku sondy	$X Y \pm 18^\circ$; Z 11 mm
Krytí	IPX8
Reprodukovatelnost maximální hodnota 2σ v libovolném směru	Hodnota 1,0 μm platí pro testovací rychlost 480 mm·min ⁻¹ v konci doteku při použití doteku s délkou 50 mm
Rozměry	$\varnothing 60 \times 50$ mm
Nástrojový držák	ISO 50
Zapínání / Vypínání	Spínač na nástrojovém držáku

Tab. 4.2 Technická specifikace obrobkové sondy RMP 60 od firmy Renishaw. [13]





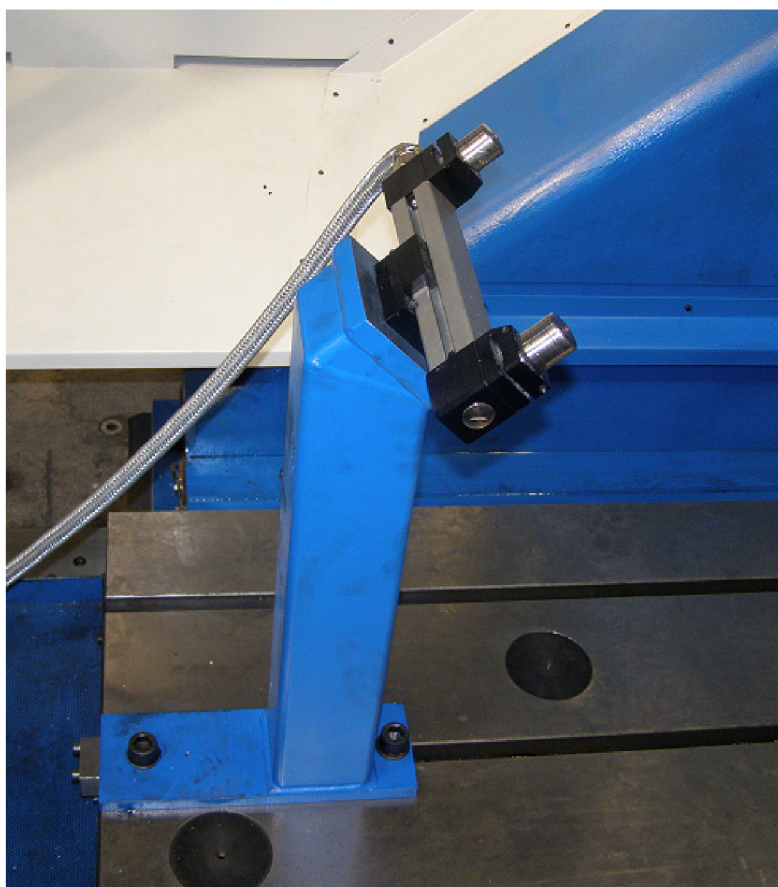
Obr. 4.4 Umístění přijímače RMI obrobkové sondy RMP 60 ve středu jednoho ze sloupů posuvného portálu. [22]

4.1.3 Volba nástrojové sondy:

Jako sonda pro měření nástroje je zde zvolen typ **NC4S** rovněž od firmy **Renishaw**. Jde o laserový měřicí systém ke kontrole rozměrů nástroje a detekci poškození. Dělená laserová sonda je zde zvolena z důvodu možného použití nástrojů o velkém průměru. Mezi pevný měřicí systém by se nástroj nemusel vejít (nutné pro měření délkového offsetu). U děleného systému lze vzdálenost vysílače a přijímače měnit a to až do vzdálenosti 1 m. Kontaktní měřicí systém je zase limitován max. obvodovou rychlostí, při jaké se může měřit. Nástroje o velkém průměru z důvodu velké obvodové rychlosti musely měřit při zastaveném vřetenu, což by mělo nepříznivý vliv na získané hodnoty (oproti laseru, který získá hodnotu při skutečných obráběcích otáčkách). Nemluvě o nevhodnosti snímání křehkých břitových destiček pomocí doteku z kalené oceli.

Renishaw NC4S	
Primární použití	Velmi přesné vysokorychlostní bezkontaktní měření nástrojů a detekce poškození nástrojů u vertikálních a horizontálních obráběcích center
Provedení	Oddělený systém (S)
Vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem	250 mm
Reprodukovatelnost	Každý vysílač a přijímač je testován při rozestupu 1 m. Specifikovaná reprodukovatelnost je $\pm 1 \mu\text{m } 2\sigma$.
Krytí	IPX8 – může být vystavena přímému působení chl. kapaliny
Měření nástroje	Od $\varnothing 0,30 \text{ mm}$
Kontrola poškození nástroje	Od $\varnothing 0,10 \text{ mm}$
Montáž	2 upevňovací otvory M 3 x 0,5 P plus 2 otvory pro kolíky $\varnothing 2 \text{ mm}$

Tab. 4.3 Technická specifikace nástrojové sondy NC4S od firmy Renishaw. [17]



Obr. 4.5 Nástrojová sonda Renishaw NC4S, instalovaná na stroji FRFQ250. [22]



4.2 Popis možností měření s obrobkovou a nástrojovou sondou

Je zde uveden pouze seznam úkonů, které se dají na stroji se sondami provádět. Podrobnější popis jednotlivých úkonů lze nalézt v kapitole 2.1.

Obrobková sonda RMP 60:

- Ustavování obrobku pootočením souřadného systému stroje
- identifikace nulového bodu ve všech směrech
- měření rozměrů obrobku
- (korekce nástroje pomocí obrobkové sondy se neuvažuje, protože k tomu slouží nástrojová sonda).

Nástrojová sonda NC4S:

- Měření skutečného průměru a délky nástroje laserem
- měření kontury nástroje (vícebodové měření nástroje)
- kontrola poškození nástroje.

Ve většině běžných aplikací ale požaduje zákazník pouze automatické ustavení obrobku, identifikaci nulového bodu obrobku a proměření nástroje laserem s následnou automatickou korekcí. Protože při dobře ustaveném obrobku, správné korekci nástroje a dobrém stavu stroje (z hlediska geometrické přesnosti) lze vyrobit vyhovující kus bez nutnosti dalšího proměření a doobrobení.

4.3 Programování obrobkové a nástrojové sondy

Obrobková sonda je ovládaná řídicím systémem Sinumerik 840D od firmy Siemens a je zapojena letmo tzn. přímo do řídicího systému. Řídicí systém Sinumerik 840D disponuje řadou měřících cyklů. Jde ale pouze o cykly dotykových sond (nástrojových a obrobkových). Proto je laserová nástrojová sonda řízena pomocí cyklů od Renishaw.

Programy jednotlivých sond se dají kombinovat. Např. se ustaví obrobek a nastaví nulový bod, následně se vyhrubuje, pak se zjistí jakou hodnotu má mít poslední přídavek při obrábění načisto a dokončí se. Nakonec se ještě může proměřit hotový kus. Mezi operace se sondou lze samozřejmě začlenit i sondu nástrojovou. Kdy se např. po vyhrubování obrobku změří dokončovací nástroj a zavedou se korekce.

4.3.1 Způsoby řízení obrobkové sondy RMP 60

Sondu lze ovládat dvojitým způsobem:

- A) Ručně
- B) Programově

A) Ruční ovládání sondy:

Ručně, v režimu JOG se ustavují a proměřují obrobky při kusové výrobě. U tohoto druhu ovládání sondy záleží rychlost a kvalita výsledků měření pouze na zkušenostech a pečlivosti obsluhy.

Postup ručního ustavení polotovaru a měření obrobku je následující:

- Jako nástroj se nastaví obrobková sonda.
- Při ustavení i při proměření se vždy sondou ručně najede poblíž místa, ve kterém se má měřit (ve vzdálenosti cca 40 mm).
- Na panelu stroje se označí ikona požadovaného druhu měřicího cyklu, který se má vykonat. Cykly jsou rozděleny do 6 kategorií – měření na 1 hraně, měření 2 hran (když není obrobek pravoúhlý), vnitřní měření průměrů a drážek, vnější měření průměrů a drážek, obecné měření v prostoru a kalibrační cykly (obr. 4.6). Cykly jsou stejné pro měření i pro ustavení. Záleží pouze na konkrétním nastavení.

Stroj: FRFQ250_VR JOG \SYF.DIR
OSTORE1.SYF
Program přerušen

Kanál RESET ROV

700563

WCS	Pozice	Posun REPOS	Master vřeteno S1
X	217.390 mm	0.000	Akt. 0.000 o/min
Y	-21.798 mm	0.000	Pož. 0.000 o/min
Z	-213.839 mm	0.000	Pol. 0 stup
C	-90.000 stup	0.000	100.0 %
B	0.000 stup	0.000	Výkon 0%

G54

Měření obrobku

1) Vybere se měření obrobku 2) Zvolí se potřebný měřicí cyklus

Kalibrace sondy

Nakládání Měření obrobku Měření nástroje

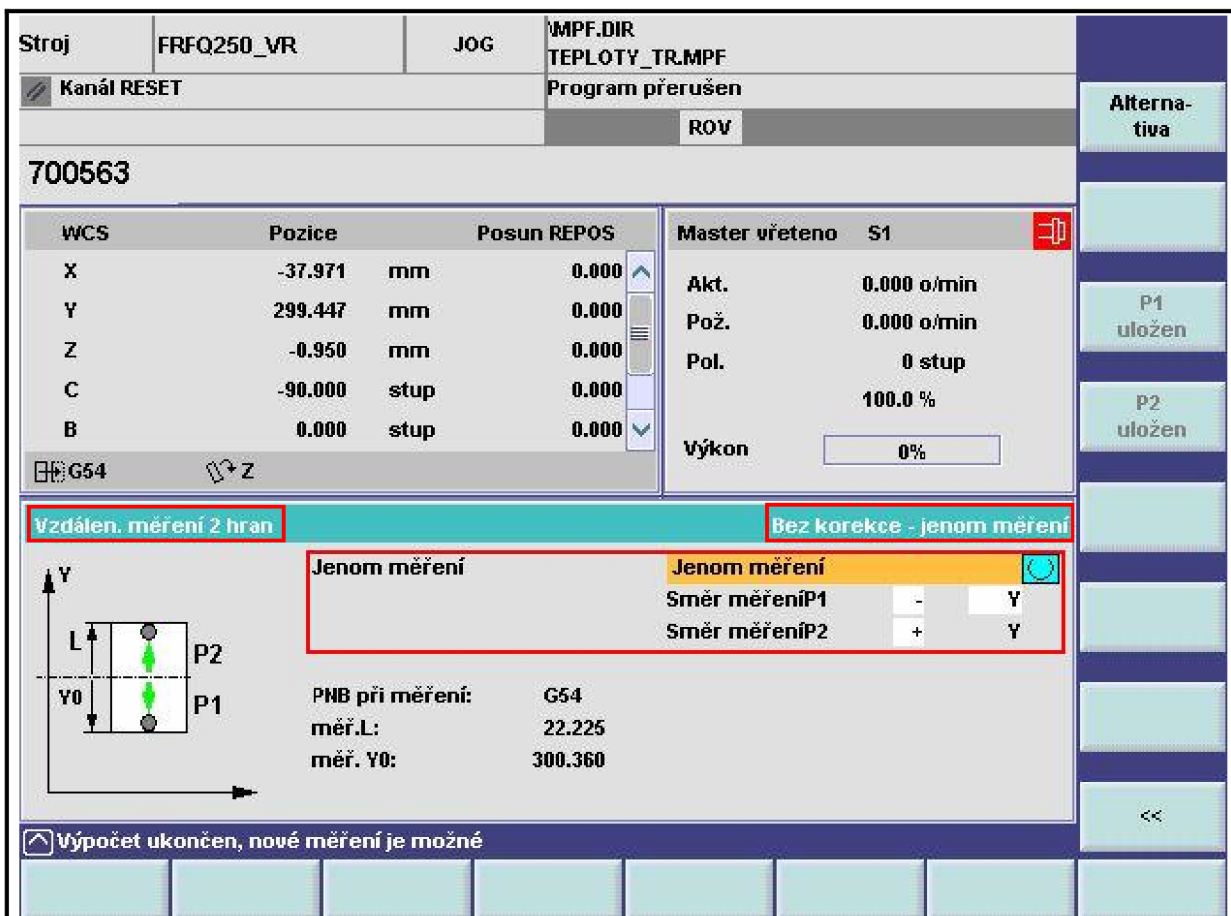
Obr. 4.6 Výběr druhu měření. [22]

- U **ustavení** se zadá „automatická korekce v posunutí počátku“ a zvolí se vyrovnání hrany. K tomu je potřeba nasnímání 2 bodů na jedné hraně. Vybere se bod, který se má posunout např. G54. Nastaví se směr měření, vztažná osa, jestli se má pootočit souřadný systém stroje nebo otočný stůl a požadovaný úhel natočení. Skutečná hodnota úhlu natočení před korekcí je pak vidět přímo na panelu stroje. Stejným způsobem se posune nulový bod do horního rohu polotovaru nasnímáním 1 bodu na každé ploše polotovaru. Tím je ustavení dokončeno (obr. 4.7).

Stroj	FRFQ250_VR	JOG	MPF.DIR TEPLOTY_TR.MPF	Alternativa Pos. nul. bodu P1 uložen P2 uložen <<
Kanál RESET			Program přerušen	
			ROV	
700563				
WCS	Pozice	Posun REPOS	Master vřeteno S1	
X	198.652 mm	0.000	Akt. 0.000 o/min	
Y	-22.083 mm	0.000	Pož. 0.000 o/min	
Z	-213.839 mm	0.000	Pol. 0 stup	
C	-90.000 stup	0.000	100.0 %	
B	0.000 stup	0.000	Výkon 0%	
G54		Z		
Vyrovnání hrany			Aut. korekce v posunutí počátku	
		Pos.počát. X 0.000 stup Y 0.000 stup Z 0.082 stup PNB při měření: G54 α 0.082	G54 Směr měření + Y Vztažná osa X Korekce úhlu Rot. souř. Požad. úhel 0.000	
WCS se potočil okolo nástrojové osy, nové měření je možné				

Obr. 4.7 Ustavování polotovaru. [22]

- Pokud se požaduje pouze **měření**, zadá se „bez korekce - jenom měření“ (obr. 4.8). Zvolí se druh měření. A opět se zadají směry měření nebo vztažná osa, ke které se má měřit úhel. Lze měřit: libovolný bod v prostoru, 2 body – úhel natočení, můstek, drážku a průměry (vnitřní i vnější). Při měření průměru je měřicí cyklus podobný jako při měření vzdálenosti. Změří se 2 libovolné body v jedné ose, poté sonda najede přesně na jejich střed a na této souřadnici teprve proběhne měření průměru v druhé ose. Mimo směry měření se zde zadává i průměr měřeného otvoru, bezpečná vzdálenost nad součástí (při měření čepu) a hloubka přísuvu při samotném měření.



Obr. 4.8 Ruční měření v režimu JOG.

Měření a ustavování v režimu JOG je poměrně jednoduché. Napomáhá tomu i to, že je program do jisté míry interaktivní. Při konkrétním měřicím úkonu se vždy zobrazí náčrt dané situace včetně nastavených směrů, vztažné osy atd. Tím lze jednoduše zkontrolovat správnost zadaných parametrů, potřebných k měření. Podrobný popis jednotlivých úkonů je v manuálu Cykly dotykových sond (BNM), část 4 - měření v režimu JOG. [8]

B) Programování obrobkové sondy:

Pokud chceme aby sonda pracovala v automatickém cyklu, musíme zhotovit vhodný NC program. Programování může probíhat buď přímo na ovládacím panelu stroje (to je vhodné u jednodušších aplikací) nebo na PC. Využívá se k tomu řada cyklů řídicího systému Sinumerik 840D. Podrobně jsou tyto cykly popsány v manuálu Cykly dotykových sond (BNM), část 5 – cykly měření pro frézovací a obráběcí centra [8]. A to včetně zadávání všech potřebných parametrů.

Přehled cyklů měření:

CYCLE961 - Automatické nastavení vnitřního a vnějšího rohu.

CYCLE976 - Kalibrace měřicího čidla pro obrobky v libovolném otvoru (rovina) resp. na libovolné ploše (aplikáta).

CYCLE977 - Měření otvoru, hřídele, drážky, můstku nebo zjištění posunutí nulového bodu paralelní s osou.

CYCLE978 - Měření v 1 bodě nebo zjištění posunutí nulového bodu na ploše.



CYCLE979 - Měření otvoru, hřídele, drážky, můstku nebo zjištění posunutí nulového bodu pod libovolným úhlem.

CYCLE998 - Měření úhlu (pouze zjištění posunutí nulového bodu).

Přehled potřebných pomocných programů

CYCLE100 - Protokolování ZAP.

CYCLE101 - Protokolování VYP.

CYCLE102 - Volba obrazu výsledků měření.

CYCLE103 - Přednastavení vstupních dat.

CYCLE105 - Generování obsahu protokolu.

CYCLE106 - Řízení běhu: protokolování.

CYCLE107 - Výpis textů hlášení.

CYCLE108 - Výpis alarmů.

CYCLE113 - Čtení data a času systému.

CYCLE116 - Výpočet středu kružnice.

CYCLE118 - Formátování reálných hodnot.

CYCLE104, CYCLE110, CYCLE111, CYCLE112, CYCLE114 - interní podprogramy.

Tvorba programu:

Budeme testovat vliv rychlosti snímání na přesnost sondy. Potřebujeme tedy zhotovit program, ve kterém se budou střídavě měřit 2 kruhové kalibry při různých rychlostech posuvu (bližší popis viz. kap. 4.5.1). Měření budeme opakovat pro každou rychlost 10x za sebou. Průměry kalibrů jsou 125,017 mm a 175,032 mm.

Jde tedy o:

- Naprogramování délkové a průměrové kalibrace sondy – CYCLE 976
- střídavého proměření 2 vnitřních průměrů – CYCLE 977
- měření obou průměrů budeme opakovat 10x za sebou, výsledky zaznamenejeme ve formě protokolu o měření a přepíšeme do tabulky
- přepsání rychlosti ručně v programu a opakování měření (pro rychlosti 250, 500, 750, 1000 a 1250 mm·min⁻¹).
- celý program provedeme při nastavení sondy jako multičidla (všesměrové snímání) a poté jako monočidla (natáčení vždy stejným směrem).

- Stejný program použijeme pro měření vlivu nesprávného nastavení rychlosti, navíc během měření budeme postupně měnit hodnoty OVERRIDE (30 až 120 %) ručně kolečkem, přímo na panelu stroje.

Celý program použitý pro obrobkovou sondu je uveden v **příloze 1**.

4.3.2 Program nástrojové sondy

Jelikož řídicí systém Sinumerik 840D nedisponuje měřícími cykly pro bezkontaktní nástrojové sondy, použijí se cykly od výrobce sondy Renishaw.

Generování cyklů probíhá v aplikaci od výrobce a záleží na instalačních parametrech (poloze) sondy.

Postup vygenerování cyklů měření je následující:

- Spustí se program na přiloženém CD
- zadá se volba „generate macros“
- nastaví se skutečná pozice sondy vůči souřadnému systému stroje a další potřebné parametry (viz obr. 4.9)
- zadá se volba „run“
- výsledkem je textový soubor obsahující všechny potřebné cykly, který stačí nahrát do řídicího systému stroje.



Please enter the installation parameters

<p>Units</p> <p><input type="text" value="(mm) Metric setting units"/> For this page and the setting data file</p> <p>NC unit axis setup:</p> <p><input type="text" value="(Ls) Laser beam: Y axis"/></p> <p><input type="text" value="(Ra) Radial measure: X axis"/></p> <p><input type="text" value="(Sp) Spindle: -Z axis"/></p> <p><input type="text" value="Radial Measure (- side)"/></p> <p><input type="text" value="Radial Calibration (- side)"/></p> <p>Tool Offset:</p> <p><input type="text" value="0"/> Magazine number for tool management</p> <p><input type="text" value="Radius offset"/></p> <p><input type="text" value="50"/> Maximum tool length</p> <p><input type="text" value="50"/> Minimum tool length</p> <p><input type="text" value="30"/> Maximum tool diameter</p> <p><input type="text" value="0"/> +/- Diameter set on one side(0=option off)</p> <p>Software Setup</p> <p><input type="text" value="1"/> Safe return position</p> <p><input type="text" value="English"/> Message language</p> <p><input type="checkbox"/> Advanced software settings (defaults recommended)</p>	<p>Interface</p> <p><input type="text" value="100"/> Pulse width in milli seconds</p> <p><input type="text" value="1000"/> NC Drip rejection setting</p> <p><input type="checkbox"/> Are M-codes installed to enable 'Latch mode'</p> <p><input type="text"/> Latch ON M-code number</p> <p><input type="text"/> Latch OFF M-code number</p> <p><input type="checkbox"/> Are M-codes installed to enable 'Tool break mode'</p> <p><input type="text"/> Tool break ON M-code number</p> <p><input type="text"/> Tool break OFF M-code number</p> <p><input type="checkbox"/> Are M-codes are provided for controlling spindle speed RPM override</p> <p><input type="text"/> Spindle override ON M-code number</p> <p><input type="text"/> Spindle override OFF M-code number</p> <p><input type="checkbox"/> Tick, if an air blast option is installed</p> <p><input type="text"/> Air Blast ON M-code number</p> <p><input type="text"/> Air Blast OFF M-code number</p> <p>Machine (Important: read information text before completing this section)</p> <p><input type="text" value="Measuring input 1 (MEPUS 0) N/O"/> Measuring input</p> <p><input type="text" value="Measuring input 1 (MEPUS 0) N/O"/> Status input</p>
---	---

Obr. 4.9 Zadání instalačních parametrů při generování cyklů sondy NC4S. [20]

Jakmile jsou cykly nainstalovány ve stroji, postupuje se stejně jako u programování obrobkové sondy. Program se může psát přímo na panelu stroje nebo na PC. Opět se píše klasický NC kód a volají se požadované cykly jako podprogramy. Před zavoláním cyklu se musejí zadat potřebné parametry. Ty jsou podrobně popsány v manuálu sondy NC4S [20].

**Přehled cyklů sondy NC4S:**

L9860 – Ustavení laserového paprsku.

L9861 – Kalibrace sondy referenčním nástrojem. Také teplotní kompenzace nepřesností vzniklých oteplením vřetena.

L9862 – Měření délky a poloměru nástroje, kontrola jednotlivých břitů.

L9863 – Detekce zlomení nástroje.

L9865 – Měření kontury nástroje (vícebodové měření pro tvarové frézy, konvexní a konkávní frézy).

L9866 – Detekce zlomení dlouhých a tenkých nástrojů, např. vrtáků.

L9760 až 9769 – Pomocné výpočtové cykly.

Tvorba programu:

Budeme testovat reprodukovatelnost měření kalibračního nástroje. Dále budeme měřit čelní frézu válcovou. Program bude následující:

- Jako nástroj vybereme kalibrační trn
- použijeme cyklus nástrojové sondy **L9862** pro měření délky a poloměru nástroje
- měření 10x opakujeme.

- Pro měření válcové frézy použijeme stejný program, navíc budeme měnit ručně kolečkem hodnotu **VERRIDE** z 50% na 120%, abychom zjistili vliv nesprávného nastavení rychlosti na přesnost snímání.

Program, použitý pro měření nástrojovou sondou je uveden v **příloze 2**.

4.4 Vyhodnocení dosahované přesnosti měřicího systému

4.4.1 Obrobková sonda RMP 60

Celková dosažitelná přesnost závisí na:

- Přesnosti polohování stroje FRFQ 250
- přesnosti sondy RMP 60 a použitém dotyku (přímý, délka 100 mm)
- rozlišovací schopnosti a typu použitého odměřovacího systému stroje - inkrementální odměřování Heidenhain.

Maximální chyby, které vzniknou při měření se sondou se dají zjistit z již naměřených podkladů. Ke každému stroji se totiž provádějí kalibrační zkoušky. Výsledkem je funkce (přímka nebo přímka omezená shora maximální hodnotou) charakterizující přesnost polohování stroje. Pro zjištění dosahované přesnosti celého měřicího systému, přičteme k polohové úchylce stroje hodnotu přesnosti sondy (viz. graf 4.1).

Zmiňovaná přesnost polohování stroje je dána rovnicí:

$$P(L) = \pm \left(A + \frac{L}{B} \right) \quad (4.1) \quad \text{nebo} \quad P(L) = \pm \min \left\{ A + \frac{L}{B}; C \right\} \quad (4.2)$$

Kde: P(L) – polohová úchylka v závislosti na vzdálenosti [mm]
A, B, C – konstanty [-]
L – poloha [mm].

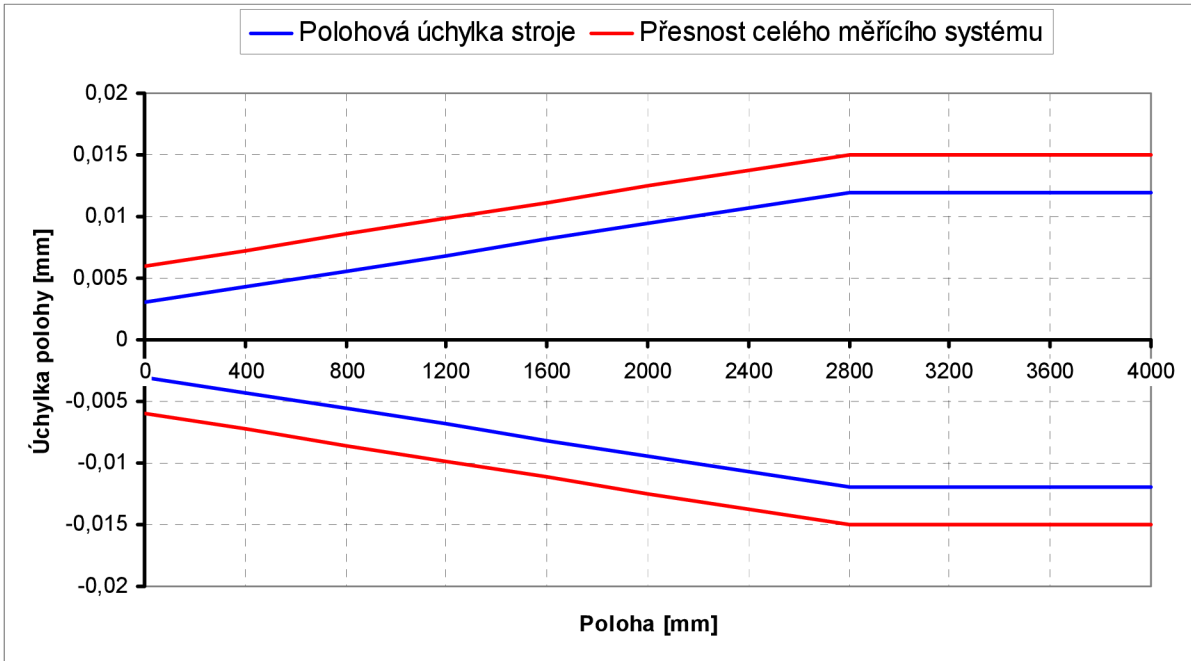
Musí se vzít ohled na to zda snímáme body v jednom směru, bez pootočení vřetena (měření posunutí NB, natočení) nebo ve více směrech (měření drážky, průměru, můstku atd.).

- A) Ve více směrech se projeví hodnota její přesnosti.
- B) V jednom směru se projeví hodnota reprodukovatelnosti.

Add A)

Přesnost sondy při snímání ve všech směrech a s přímým dotykem o délce 100 mm je ±3 μm. K rovnici přesnosti polohování stroje tedy přičteme tuto hodnotu.

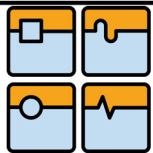
Bohužel kalibrační zkouška proběhne až u zákazníka, a skutečné hodnoty nejsou k dispozici. Proto uvedu alespoň příklad, u kterého jsou hodnoty velmi podobné.



Graf 4.1 Polohová úchylka stroje (modře) a přesnost celého měřicího systému (červeně) při snímání ve více směrech.

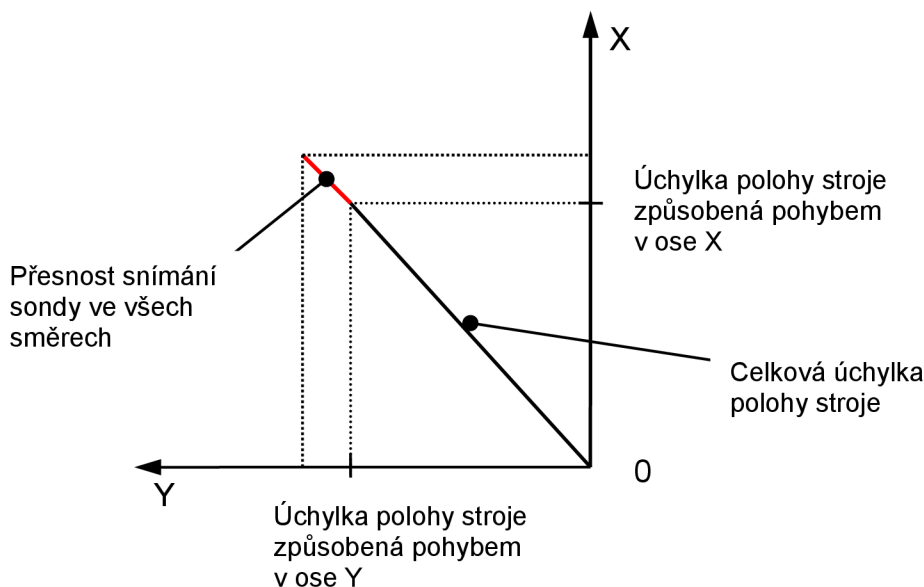
Při měření v celé dráze pojezdu dojde k maximálním odchylkám. Sonda se ale většinou při měření nepohybuje v celé délce pojezdu, ale pouze na jeho části. A čím je vzdálenost od referenčního bodu odměřovacího systému kratší, tím je menší i chyba, ke které dojde při snímání daného bodu (viz. graf 4.1).

Také pokud se obrobková sonda pohybuje v jedné ose, dojde k menší odchylce než při měření ve více osách. Pokud bychom chtěli zjistit odchylku při snímání ve více osách zároveň (např. pro měření v pootočeném souřadném



systemu, obecné měření v prostoru), sečteme velikosti odchylek a poté k nim přičteme přesnost sondy (protože platí pro všechny směry) – obr. 4.10.

Chyba, ke které dojde při měření v osách X a Y zároveň:



Obr. 4.10 Chyba měřicího systému, způsobená pohybem ve více osách zároveň.

Chyba rozměru měřeného v osách X a Y:

$$Chyba_{XY} = \sqrt{Chyba_X^2 + Chyba_Y^2} + Chyba_{sondy} \quad (4.3)$$

Analogicky pro ostatní osy.

Hodnota vzniklé nepřesnosti je tedy mnohem větší. U ustavení se tento problém dá vyřešit použitím CYCLE 961 – nastavení vnějšího a vnitřního rohu, kdy se měří vždy rovnoběžně s osami, výsledkem je pootočení součásti a nastavení nulového bodu zároveň.

Měření by se tedy z důvodu přesnějších výsledků mělo provádět vždy v souřadném systému, který je rovnoběžný s původními osami stroje.

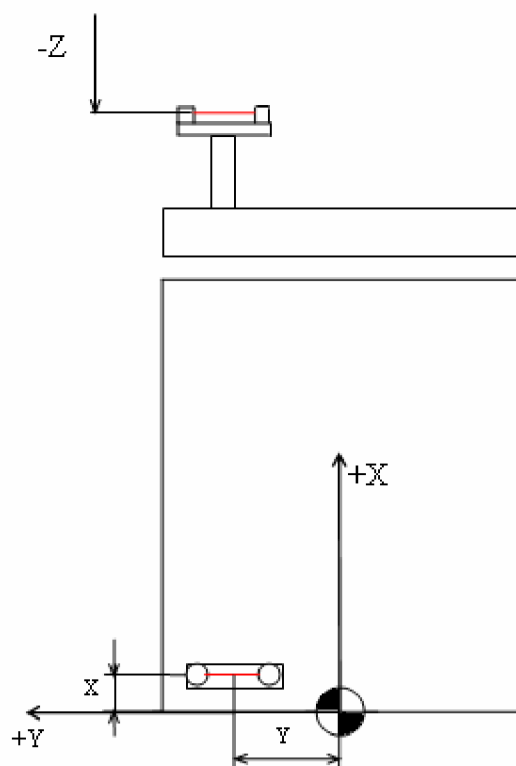
Add B)

Při snímání bodů pouze v jednom směru se projeví místo přesnosti snímání reprodukovatelnost. Chyba tedy bude složena z polohové úchytky stroje a hodnoty reprodukovatelnosti sondy RMP 60, která je 1 μ m. Jinak bude všechno stejné jako u měření ve více směrech zároveň.

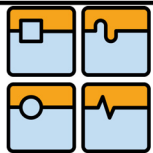
4.4.2 Nástrojová sonda

Nástrojová sonda je připevněna přímo na obráběcím stole a je nastavena k měření pouze z jedné strany. Přesná poloha středu paprsku v jednotlivých osách se stanovuje při první operaci – ustavení paprsku, a je zapsána v parametrech. Měření průměru (nebo poloměru) nástroje probíhá v ose $-X$ a měření délky nástroje v ose $-Z$.

Pokud chceme zjistit nejvhodnější místo pro uložení nástrojové sondy, bude to určitě místo s nejmenší chybou odměřovacího systému. V našem případě, u inkrementálního odměřovacího systému, je nejmenší chyba v referenčním bodu (viz. obr. 4.11). Sonda by ale na tomto místě překážela a tak je umístěna bokem. Hodnotu opakovatelnosti měření s nástrojovou sondou NC4S v tomto místě budeme zjišťovat v jednom z testů (kap. 4.5.2).



Obr. 4.11 Umístění nástrojové sondy NC4S na stole obráběcího centra FRFQ 250.



4.5 Testování měřicího systému

Slovník použitých pojmů:

Podle [21].

Chyba měření – [podle TNI 010115:2009, 2.16] – rozdíl naměřené hodnoty a její skutečné velikosti.

Odchylka – v metrologii není definována, dříve byla [podle ČSN 01 0115:1996, 3.10] - výsledek měření minus pravá hodnota měřené veličiny.

Úchylka – v metrologii tento pojem není definován, přesto se používá.

Úchylka polohy, polohová úchylka – [podle ČSN ISO 230-2:1999, 2.5] rozdíl mezi skutečnou polohou, dosaženou nastavovanou částí a zadanou polohou.

Opakovatelnost měření – Těsnost shody mezi výsledky po sobě následujících měření téže veličiny, provedených za podmínek opakovatelnosti.

Podmínky opakovatelnosti jsou: stejný postup měření, stejná obsluha, stejný měřicí systém, stejné pracovní podmínky a stejné místo. A opakování měření na stejných objektech, v co nejkratší časové periodě.

[podle VIM3:2007 → Mezinárodní metrologický slovník – Základní a obecné pojmy a přidružené termíny]; dostupné také na [25].

Odchylka - Výraz definovaný ve statistice, charakterizuje vzdálenost měřeného znaku od jeho aritmetického průměru.

4.5.1 Testování obrobkové sondy


A) Test vlivu vysoké snímací rychlosti na přesnost měření

Jedním z hlavních požadavků kladených na obrobkové sondy, je zkrácení vedlejších výrobních časů. To znamená že se po nich požaduje maximální rychlost měření při současném dodržení požadavků na přesnost a spolehlivost měřicího procesu.

Toho se dá s úspěchem využít například při ustavování větších kusů, u kterých se nepožaduje taková přesnost. Např. u větších odlitků se často dávají velké tolerance, i v celých milimetrech. Každý kus je ale do jisté míry jiný a jeho ustavení nelze vyřešit pouze upínacím přípravkem. Proto se před obráběním musí polohy důležitých rozměrů správně rozměřit a zadat do programu stroje. Ručně je to velmi zdoluhavá činnost a provádí se pomocí úchylkoměru upnutého přímo na obráběcí hlavě stroje, pomocí magnetického stojánku s objímkou. Sonda tedy bude k této aplikaci vhodná a lze uvážit i měření ve větší rychlosti.

Sonda se dodává s továrním nastavením rychlosti snímání $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Maximální rychlost není v katalogu uvedena. Lze předpokládat, že celý měřicí systém (RMP60 + FRFQ250) se dopustí při větších rychlostech i větší chyby. Provedeme tedy test, který určí jestli měřicí systém při nastavení větší rychlosti neztratí potřebnou vypovídající schopnost (vlivem sondy a polohové úchyly stroje).

Jelikož jde o stroj s velkým pracovním prostorem a inkrementálním odměřovacím systémem. Lze odůvodněně předpokládat, že chyba měření způsobená zvyšováním rychlosti bude mnohem menší, než chyba způsobovaná

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 56
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

inkrementálním odměřovacím systémem stroje ve větší vzdálenosti od jeho referenčního bodu. To jsme si ověřili několika ručními měřeními, při malé a velké rychlosti. Nebudeme tedy sledovat samotnou velikost chyby měření. Ale zaměříme se na ukazatele nestejnorodosti naměřeného souboru hodnot, které nám k posouzení chování budou postačovat.

Určíme si tedy interval spolehlivosti ve kterém bude ležet vysoké procento naměřených hodnot, získaných opakovaným měřením při stejných podmínkách pro různé rychlosti.

Co se týče podmínek měření, tak bude vhodné napodobit některý z klasických měřicích úkonů. Nejčastěji se měří nejružnější dvojice bodů a z nich se vyhodnotí potřebný rozměr. Poté se změří další dvojice bodů a celý proces se po obrábění opakuje.

Jako měřený předmět vybereme vhodnou součást, s dostatečnou porovnávací schopností (např. kalibrický kroužek), a budeme ji opakovaně měřit. Mezi jednotlivými opakováními musíme stroj i sondu „rozhodit“, tak jak se to děje při obrábění a měření jiných rozměrů. Tzn. opodál umístíme další součást, najedeme k ní a změříme ji.

Protože měření proběhne v montážní hale těžkých obráběcích strojů, kde nejsou podmínky pro měření ideální (vibrace od dílenských jeřábů). Použijeme jako druhou součást další kalibr, který slouží čistě pro kontrolu a bude se měřit současně. V případě přenesených vibrací z jeřábu až na stroj poznáme že 2 nebo více, těsně po sobě jdoucích hodnot měření je zatíženo hrubou chybou. V tom případě měření zopakujeme.

Budeme tedy měřit střídavě 2 kruhové kalibry o \varnothing 175,032 mm a \varnothing 125,017 (jsou to porovnávací kalibry, ocejchované – jejich rozměr je tedy přesný na tisícinu a tím pádem pro naši aplikaci dostačující).

Budeme sledovat chování sondy při rychlostech posuvu $F = 250, 500, 750, 1000$ a $1250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a vypočítáme potřebné parametry.

Testovat větší rychlosti než $1250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ není potřeba, protože vzniklé nepřesnosti dosahují vysokých hodnot. Také síla, působící na dotyk sondy po sepnutí, je mnohem větší. A jelikož jde o sondu s mechanickým senzorem, došlo by při dlouhodobém provozu ve velkých rychlostech ke značnému zkrácení životnosti zařízení.

Měření jsme provedli při nastavení sondy jako:

- Multičidla - všesměrové snímání, vřeteno se nenatáčí.
- Monočidla – sonda se polohuje k měřené ploše vždy stejným směrem.

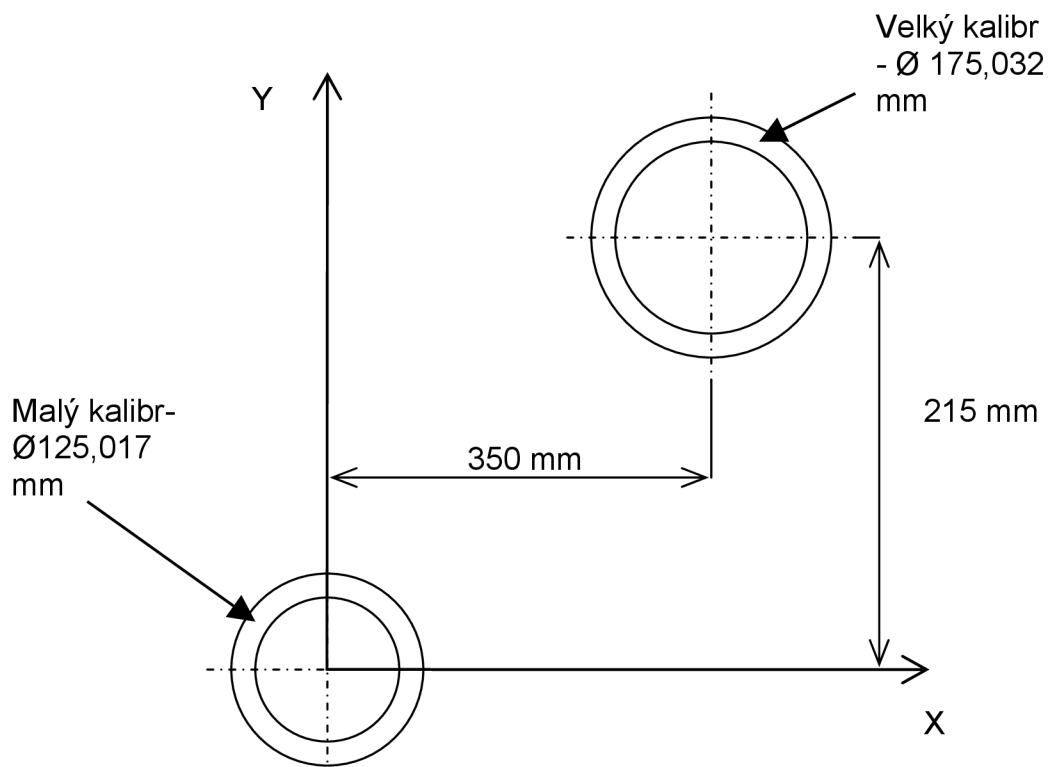
Protože jde o 3-D sondu, neměly by se výsledky měření nijak lišit. Alespoň uvidíme, zda má sonda dostatečně kruhovou charakteristiku přesnosti.

Po každé změně rychlosti musela následovat kalibrace sondy pro danou rychlost (na kalibru o \varnothing 125,017). Vliv kalibrace se totiž projeví pouze pro jednu rychlost. Při jiné rychlosti, než na jakou je sonda zkalibrována, dochází k velkým odchylkám viz. část B). Výsledky měření jsou zpracovány tabelárně a zaneseny do grafů pro lepší přehlednost.

**B) Vliv nesprávně nastavené rychlosti na měření**

Pokud sonda měří při jiné rychlosti než na jakou je zkalibrována, dochází k hrubé chybě měření. To je způsobeno špatným výpočtem dráhy, kterou sonda urazí za dobu reakce řídicího systému a počítá se na základě kalibračních údajů.

Na následujícím příkladu budeme demonstrovat negativní vliv jiné rychlosti, než kalibrační na přesnost měření. Sondu zkalibrujeme na měření rychlostí $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Poté budeme pomocí kolečka **VERRIDE** na ovládacím panelu stroje nastavovat rychlost v procentech a hodnoty odchylek zaznamenáme do protokolu a dále vyhodnotíme.

Schéma umístění kalibrů při testování:

Obr. 4.12 Schéma umístění kalibrů při testování.

Kalibry jsou rozmístěny podle obrázku, střed malého kalibru bude náš bod G54 (ve strojních souřadnicích je to bod $X, Y, Z \doteq [1250, 250, 500]$).

Postup:

- 1) Kalibry se umístí na stůl a upevní magnetickým upínačem.
- 2) Nastaví se rychlost měření (250, 500, 750, 1000, 1250 mm/min)
- 3) Sonda se zkalibruje na malém kalibru.
- 4) Provede se měření vnitřního průměru velkého kalibru, poté malého kalibru
- 5) Měření se opakuje 10x za sebou
- 6) Nastaví se další rychlost – rychlosti nebudeme měřit postupně ale náhodným výběrem.

Na obou kalibrech celkem proběhlo:

- A) Střídavě 10 měření při 5 různých rychlostech posuvu jak pro monočidlo, tak pro multičidlo.
- B) 10 měření, při nesprávně nastavené rychlosti.

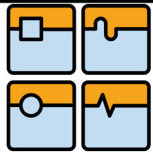


Obr. 4.13 Testování vlastností měřicího systému. [22]

Hodnoty uvedené ve všech tabulkách jsou vyčtené z protokolů o jednotlivých měřeních. Protokoly lze nalézt na přiloženém DVD.

Vyhodnocení jednotlivých měření:

U každého kalibru jsme si naměřili 10 hodnot pro danou rychlost. Hodnoty nejsou vždy stejné, ale pohybují se v určitém rozsahu. To je způsobeno náhodnými chybami měřicího systému. Budeme tedy muset hodnoty náležitě statisticky zpracovat a určit interval spolehlivosti pro dané procento spolehlivosti a při známém rozdělení. Rozdělení hodnot budeme předpokládat normované normální (Gaussovo) rozdělení. Výsledky měření jsou zpracovány tabelárně a zaneseny do grafů pro lepší přehlednost.



Použité vzorce :

Podle [18].

Pro normální rozdělení $N = \{\mu, \sigma^2\}$

Bodový odhad střední hodnoty (aritmetický průměr):

$$\mu \doteq \bar{x} \quad (4.4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad [\mu\text{m}] ; \text{ počet měření } n=10 ; i - \text{ číslo měření} \quad (4.5)$$

Odhad směrodatné odchylky:

$$s \doteq \sqrt{\sigma^2} = \sigma \quad (4.6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2 \right)} \quad [\mu\text{m}] \quad (4.7)$$

Oboustraný interval statistické tolerance $\pm 3\sigma$, ve kterém leží hodnoty s 99,53 % pravděpodobností:

$$P_{\pm 3\sigma} = (\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma) = |6\sigma| \quad [\mu\text{m}] \quad (4.8)$$

Zbylé hodnoty leží mimo a jsou způsobeny chybou obsluhy či nevhodnými podmínkami měření (teplota jiná než 20°C, vibrace od okolních strojů).

Variabilita naměřených údajů (a v našem případě i opakovatelnost měření):

$$R = x_{i\text{max}} - x_{i\text{min}} \quad [\mu\text{m}] \quad (4.9)$$

Add A) Vliv rychlosti snímání na přesnost měření

Chyba měření zjištěná na malém kalibru Ø 125,017 mm:

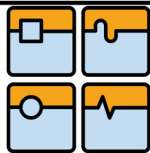
- Režim multičidla (bez natáčení vřetena při snímání):

Číslo měření	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]				
	250	500	750	1000	1250
1	-2	-3	-4	-8	-8
2	-1	-2	-2	-6	-5
3	-2	1	-1	-5	-8
4	-1	-2	-1	-1	-5
5	-2	-1	-1	-7	-7
6	-1	-2	-4	-3	0
7	-1	-3	-2	-2	-5
8	-2	-1	-4	-2	-9
9	-2	-1	1	-1	-6
10	0	-1	-1	1	-5

Tab. 4.4 Chyba měření v μm , zjištěná měřením kalibru o $\varnothing 125,017 \text{ mm}$ v režimu multičidla.

Rychlost [mm·mn ⁻¹]	250	500	750	1000	1250
Aritmetický průměr	-1,4	-1,5	-1,9	-3,4	-5,8
Minimální hodnota X_{imin}	-2	-3	-4	-8	-9
Maximální hodnota X_{imax}	0	1	1	1	0
Opakovatelnost měření $R = X_{\text{imax}} - X_{\text{imin}}$	2	4	5	9	9
Směrodatná odchylka	0,699	1,178	1,663	2,416	2,529
Statistický toleranční interval $P_{\pm 3\sigma}$	4,195	7,071	9,979	14,498	15,178
Horní mez intervalu	0,697	2,035	3,089	3,849	1,789
Dolní mez intervalu	-3,497	-5,035	-6,889	-10,649	-13,389

Tab. 4.5 Dopočítané hodnoty.



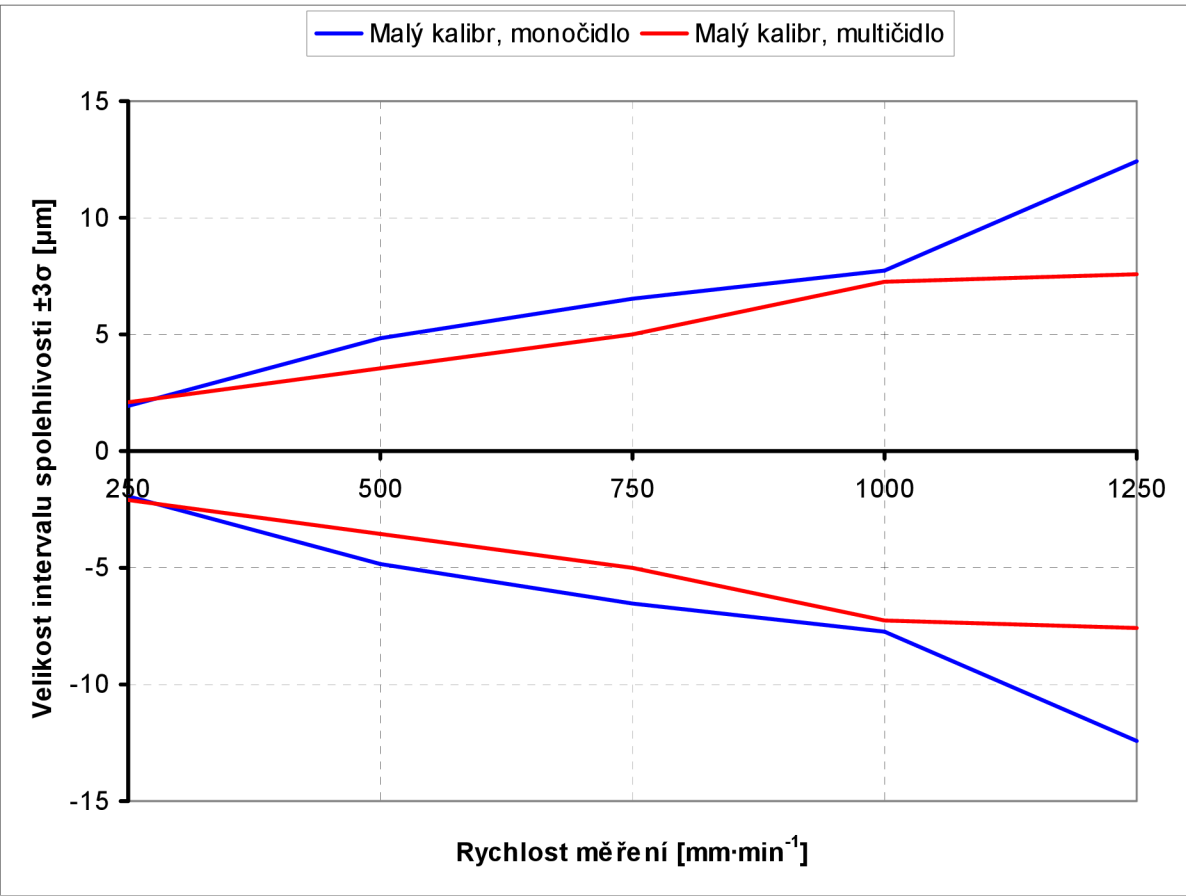
– Režim monočidla (natáčení vřetena k snímané ploše):

Číslo měření	Rychlost posuvu [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]				
	250	500	750	1000	1250
1	3	-4	-4	-5	-1
2	1	-3	-1	-4	9
3	3	-4	-2	-3	-1
4	2	-5	-4	-7	1
5	2	-6	-4	-8	-2
6	2	-6	-1	-3	3
7	2	-1	-8	-1	-6
8	2	-3	-1	-4	-2
9	3	-6	-4	0	-4
10	2	-4	-2	-1	-2

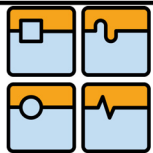
Tab. 4.6 Chyba měření v μm , naměřená na kalibru o $\varnothing 125,017 \text{ mm}$ v režimu monočidla.

Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{mn}^{-1}$]	250	500	750	1000	1250
Aritmetický průměr	2,2	-4,2	-3,1	-3,6	-0,5
Minimální hodnota X_{imin}	1	-6	-8	-8	-6
Maximální hodnota X_{imax}	3	-1	-1	0	9
Opakovatelnost měření $R = X_{\text{imax}} - X_{\text{imin}}$	2	5	7	8	15
Směrodatná odchylka	0,632	1,619	2,183	2,591	4,143
Statistický toleranční interval $P_{\pm 3\sigma}$	3,795	9,716	13,100	15,543	24,860
Horní mez intervalu	4,097	0,658	3,450	4,172	11,930
Dolní mez intervalu	0,303	-9,058	-9,650	-11,372	-12,930

Tab. 4.7 Dopočítané hodnoty.



Graf 4.2 Velikost intervalu, ve kterém pohybují hodnoty naměřené na malém kalibru s 99,53% pravděpodobností.



Chyba měření zjištěná na velkém kalibru o \varnothing 175,032 mm:

- **Režim multičidla (bez natáčení vřetena při snímání):**

Číslo měření	Rychlost posuvu [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]				
	250	500	750	1000	1250
1	-5	-5	-8	-7	-13
2	-3	-3	-15	-15	-15
3	-3	-3	-10	-9	-16
4	-4	-4	-9	-10	-14
5	-4	-4	-7	-6	-13
6	-5	-5	-6	-12	-2
7	-6	-6	-6	-9	-14
8	-4	-10	-7	-5	-3
9	-6	-6	-6	-8	-13
10	-6	-6	-7	-11	-17

Tab. 4.8 Chyba měření v μm , naměřená na kalibru o \varnothing 175,032 mm v režimu multičidla.

Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{mn}^{-1}$]	250	500	750	1000	1250
Aritmetický průměr	-4,6	-5,2	-8,1	-9,2	-12
Minimální hodnota $X_{i\text{min}}$	-6	-10	-15	-15	-17
Maximální hodnota $X_{i\text{max}}$	-3	-3	-6	-5	-2
Opakovatelnost měření $R = X_{i\text{max}} - X_{i\text{min}}$	3	7	9	10	15
Směrodatná odchylka	1,174	2,044	2,767	2,974	5,185
Statistický toleranční interval $P_{\pm 3\sigma}$	7,043	12,264	16,601	17,844	31,113
Horní mez intervalu	-1,079	0,932	0,201	-0,278	3,556
Dolní mez intervalu	-8,121	-11,332	-16,401	-18,122	-27,556

Tab. 4.9 Dupočítané hodnoty.

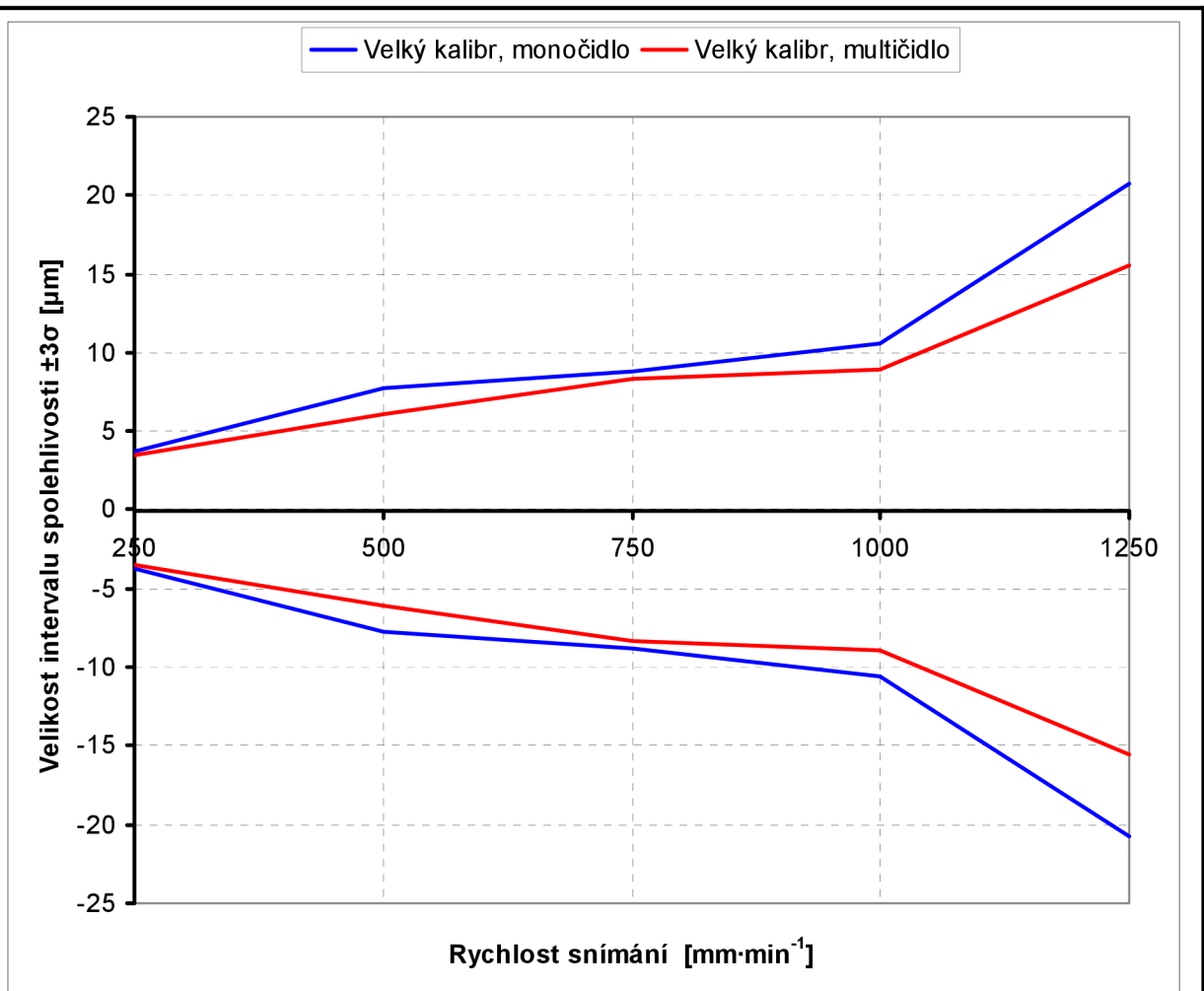
– Režim monočidla (natáčení vřetena k snímané ploše):

Číslo měření	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]				
	250	500	750	1000	1250
1	-4	-9	-8	-11	10
2	-2	-11	-8	-11	-12
3	-4	-8	-6	-10	-10
4	-3	-13	-9	-13	-13
5	-4	-9	-12	-5	-10
6	-4	-10	-8	-6	-9
7	-6	-6	-12	-7	-14
8	-2	-9	-8	-12	-9
9	-5	-11	-6	-3	-13
10	-4	-4	-2	-5	-10

Tab. 4.10 Chyba měření v μm , naměřená na kalibru o $\varnothing 175,032 \text{ mm}$ v režimu monočidla.

Rychlost [mm·mn ⁻¹]	250	500	750	1000	1250
Aritmetický průměr	-3,8	-9	-7,9	-7,9	-9
Minimální hodnota X_{imin}	-6	-13	-12	-13	-14
Maximální hodnota X_{imax}	-2	-4	-2	-3	10
Opakovatelnost měření $R = X_{\text{imax}} - X_{\text{imin}}$	4	9	10	10	24
Směrodatná odchylka	1,229	2,582	2,923	3,533	6,912
Statistický toleranční interval $P_{\pm 3\sigma}$	7,376	15,492	17,539	21,201	41,473
Horní mez intervalu	-0,112	-1,254	0,869	2,718	11,736
Dolní mez intervalu	-7,488	-16,746	-16,669	-18,483	-29,736

Tab. 4.11 Dupočítané hodnoty.



Graf 4.3 Velikost intervalu, ve kterém pohybují hodnoty naměřené na velkém kalibru s 99,53% pravděpodobností.

Grafy s hodnotami jednotlivých měření jsou k dispozici v **příloze 3**, ale jsou zde pouze pro informaci. Protože našeho testu se týká pouze interval statistické tolerance.

Výsledek tesu:

Velikost intervalu statistické tolerance $\pm 3\sigma$ se s rostoucí rychlostí skutečně zvětšuje. Zvětšuje se i s rostoucí vzdáleností od referenčního bodu inkrementálního odměřovacího systému (to je vidět i na hodnotách naměřených na velkém kalibru). Hodnoty naměřené v režimu monočidla se nijak zvláště neliší od hodnot naměřených v režimu multičidla (jsou spíše horší). Natáčení vřetene tedy zbytečně prodlužuje dobu měření.

Z výše uvedeného vyplývá že skutečná chyba se mění podle míst, kde se jednotlivá měření provádějí a roste se stoupající snímací rychlostí. Nutno podotknout, že vyráběné součásti mohou být, co se týče umístění měřených rozměrů, dosti variabilní.

Proto, by bylo obecně nejlepší posoudit nastavení rychlosti spíše jako jeden z parametrů při stanovování způsobilosti celého výrobního procesu. Ten se posuzuje u daného výrobku stanovením indexů způsobilosti.

Pro hodnocení způsobilosti procesu musí být ale splněny 2 podmínky:

- Proces musí být statisticky zvládnutý – splněno.
- Získané hodnoty musí odpovídat normálnímu rozdělení - splněno.

Postup pro nastavení maximální rychlosti s ohledem na požadovanou toleranci vyráběné součásti:

- Budeme měřit hotové výrobky a sledovat hodnotu znaků kvality (velikosti tolerovaných rozměrů) pro nastavenou rychlost, která se vytipuje na základě předchozích zkušeností.
- Hodnota skutečných rozměrů se musí držet ve stanovených tolerančních mezích. Proto spočítáme indexy způsobilosti procesu C_p a C_{pk} .
- Porovnáme hodnotu indexů způsobilosti procesu s mezní hodnotou 1,33 kdy se proces považuje za zvládnutý.
- Pokud bude hodnota indexů způsobilosti větší než mezní hodnota, lze to považovat za signál, že kvalita procesu se může mírně zhoršit.
- To znamená že se může nastavit větší rychlost snímání a celý proces ustavení nebo proměření bude mnohem kratší na úkor větší rozměrové variability výrobků.

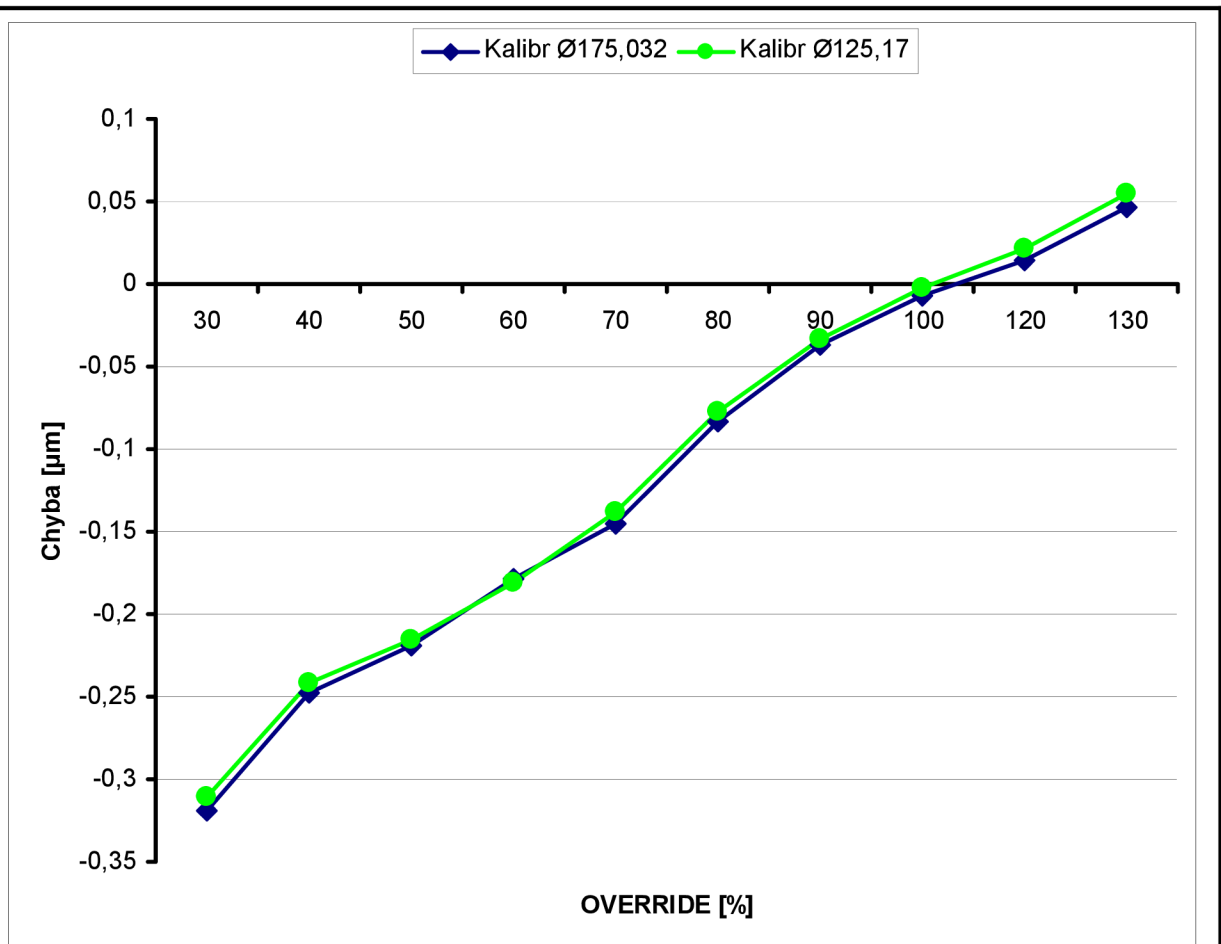
Příklad:

Je dán konkrétní výrobek a ten se má sondou na stroji změřit a dokončit na finální rozměr. Měřené rozměry budou, stejně jako v případě našeho testu, dva kruhové otvory. Hodnota průměrové tolerance je v obou případech $\pm 0,03$ mm. Hotové výrobky budeme kontrolovat a stanovíme si meze, v jakých leží požadované procento vyhovujících výrobků. Spočítáme indexy způsobilosti. Pokud budou oba indexy větší než např. 1,60. Můžeme si bez problému dovolit nastavit větší rychlost. A zvýšit tak produktivitu celého procesu.

Add B) Vliv nesprávného nastavení rychlosti

VERRIDE [%]	Kalibr $\varnothing 175,032$	Kalibr $\varnothing 125,17$
30	-0,319	-0,311
40	-0,248	-0,242
50	-0,219	-0,215
60	-0,179	-0,181
70	-0,145	-0,138
80	-0,083	-0,077
90	-0,037	-0,033
100	-0,007	-0,002
120	0,014	0,022
130	0,047	0,055

Tab. 4.12 Chyby v mm, naměřené u obou kalibrů, vzniklé nastavením jiné rychlosti než na jakou je sonda zkalibrována.
Měřeno při rychlosti $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Graf 4.4 Chyba měření při nesprávném nastavení rychlosti.

Vyhodnocení testu:

Sonda musí vždy měřit pouze při rychlosti na jakou je zkalibrována. Pokud se nastaví rychlost jiná, dojde k chybě měření vlivem špatného výpočtu skutečné dráhy, kterou sonda urazila za dobu reakce řídicího systému.

4.5.2 Testování laserové nástrojové sondy

A) Test reprodukovatelnosti měření nástroje:

Sonda je nainstalována pro měření průměru nástroje z jedné strany (-X). Testovali jsme tedy přesnost při opakovaném najíždění nástrojem na sondu v jednom směru. Proběhlo měření délky a poloměru nástroje, každé po 10 opakováních. Rychlost měření byla $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Měření proběhlo pomocí cyklu 9762 tzn. při jednom měření nástroj najede na sondu několikrát (2x) v daném směru (měření délkového offsetu a poloměru nástroje). Za výslednou hodnotu se prohlásí aritmetický průměr těchto měření.

Měření proběhlo s kalibračním nástrojem, tzv. kalibračním trnem. Rozměry kalibračního trnu jsou přesné (pro porovnání budou opět stačit). Vzniklá odchylka je tedy skutečná hodnota opakovatelnosti měření s nástrojovou sondou NC4S a při použití cyklu **L9862**. Mezi každým měřením proběhla jedna

výměna nástroje. Měření vždy probíhalo s odjezdem od sondy na nulový bod, poté návrat k sondě a samotné měření. Při statistickém zpracování jsme postupovali stejně jako u obrobkové sondy. Tentokrát jsme se ale zaměřili na hodnoru opakovatelnosti měření.

Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]

Nástr. číslo 30 – Kalibrační trn, $1500 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ Skutečné rozměry: Délkový offset = 49.975 mm Rádus = 15.022 mm				
Číslo měření	Sondou naměřené hodnoty [mm]		Chyba [μm]	
	Délkový offset	Rádus	Délkový offset	Rádus
1	49,968	15,021	-7	-1
2	49,967	15,022	-8	0
3	49,969	15,023	-6	1
4	49,968	15,023	-7	1
5	49,969	15,022	-6	0
6	49,970	15,023	-5	1
7	49,968	15,024	-7	2
8	49,969	15,022	-6	0
9	49,968	15,023	-7	1
10	49,969	15,022	-6	1

Tab. 4.13 Naměřené hodnoty délky a poloměru kalibračního nástroje.

Délkový offset	
Aritmetický průměr	-6,5 μm
Směrodatná odchylka	0,850
Statistický toleranční interval $P_{\pm 3\sigma}$	5,099
dolní mez intervalu	-9,050
horní mez intervalu	-3,950
Maximální hodnota X_{imax}	-5
Minimální hodnota X_{imin}	-8
Opakovatelnost měření $V = X_{\text{imax}} - X_{\text{imin}}$	3 μm

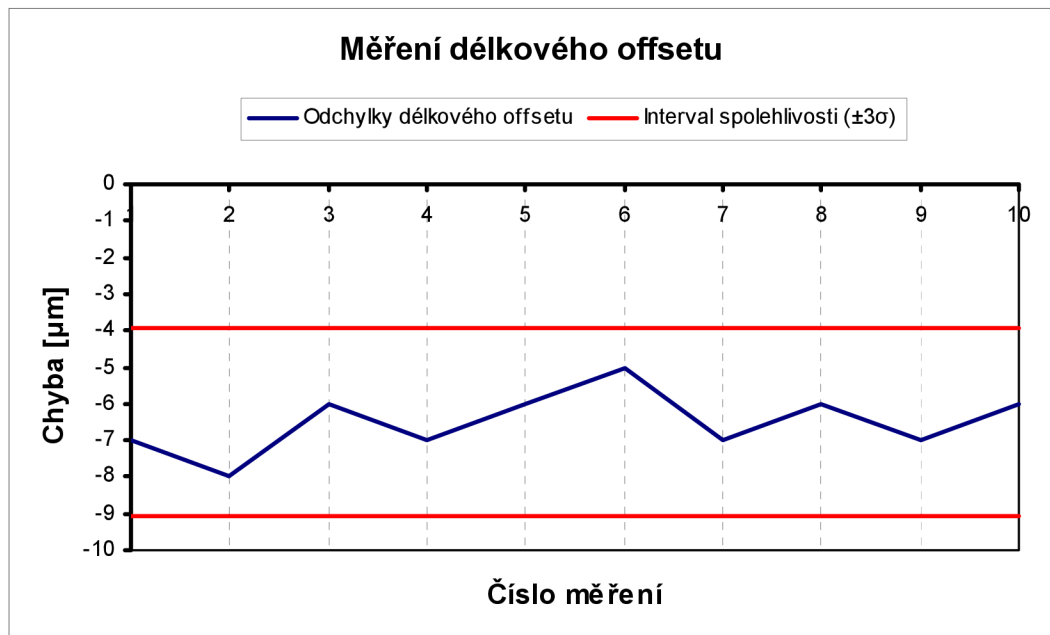
Tab. 4.14 Vyhodnocení měření délky nástroje.



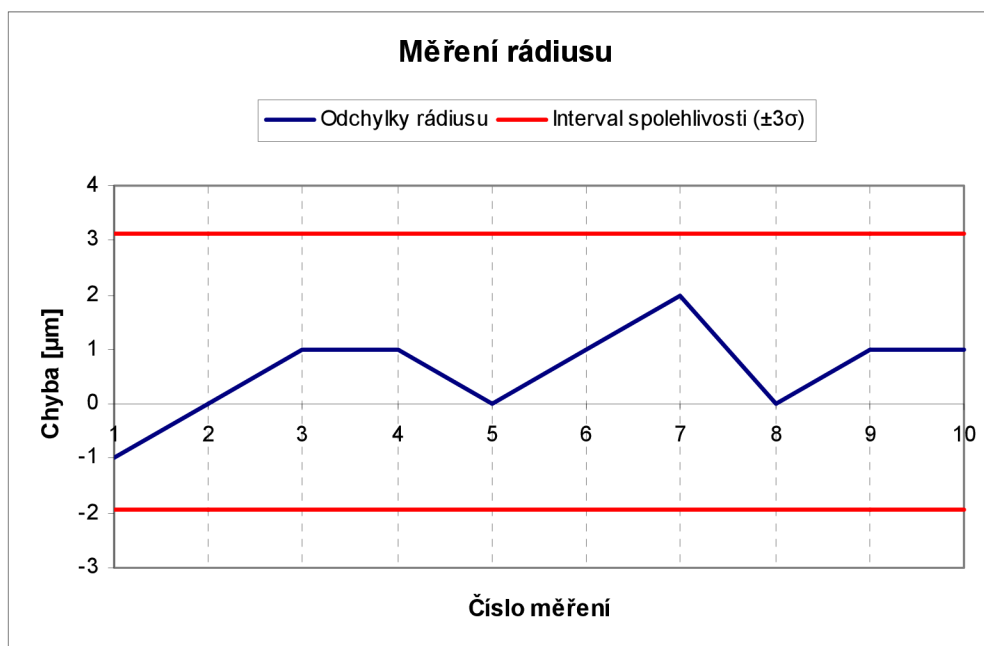
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Poloměr	
Aritmetický průměr	0,6 μm
Směrodatná odchylka	0,843
Statistický toleranční interval $P_{\pm 3\sigma}$	5,060
dolní mez intervalu	-1,930
horní mez intervalu	3,130
Maximální hodnota $X_{i\text{max}}$	2
Minimální hodnota $X_{i\text{min}}$	-1
Opakovatelnost měření $V = X_{i\text{max}} - X_{i\text{min}}$	3 μm

Tab. 4.15 Vyhodnocení měření poloměru nástroje.



Graf. 4.5 Měření délkového offsetu kalibračního trnu sondou NC4S.



Graf. 4.6 Měření poloměru kalibračního trnu sondou NC4S.

Vyhodnocení testu:

Jelikož se najíždí stále do stejného bodu a ve stejném směru (-X a -Z) projevuje stále téměř konstantní chyba odměřovacího systému stroje. Tyto hodnoty platí pouze pro měření pomocí **L9862**. Z hodnot je vidět, že odměřovací systém, v ose X dělá malou chybu ($0,6 \pm 1,5 \mu\text{m}$) protože je sonda umístěna blízko ref. bodu odm. systému (obr. 4.11). Oproti tomu v ose Z se pohybuje ve větší vzdálenosti od referenčního bodu inkrementálního odm. systému (obr. 4.11) a je to znát i na velikosti zjištěné chyby ($-6,5 \pm 1,5 \mu\text{m}$).

Naměřené hodnoty tedy ovlivňuje především místo v jakém se sonda nachází vzhledem k referenčnímu bodu inkrementálního odměřovacího systému. Sondu je proto dobré umístit co nejbližší k referenčnímu bodu.

Nástrojová sonda měří oproti obrobkové velmi přesně. Není proto třeba uvažovat o jejím nahrazení sondou obrobkovou (korekce nástroje nepřímo z rozměrů obrobku).

B) Testování vlivu špatného nastavení rychlosti na přesnost měření.

Při druhém měření jsme použili frézu čelní válcovou, kterou jsme změřili 10x při různých hodnotách **OVERRIDE**, abychom zjistili vliv nesprávného nastavení rychlosti na přesnost měření. Nastavená rychlost měření byla $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Uvedené skutečné rozměry frézy byly změřeny na specializovaném pracovišti k měření nástrojů ve firmě TOS Kuřim.



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Nástroj číslo 1 – Fréza čelní válcová, 2500 ot·min⁻¹

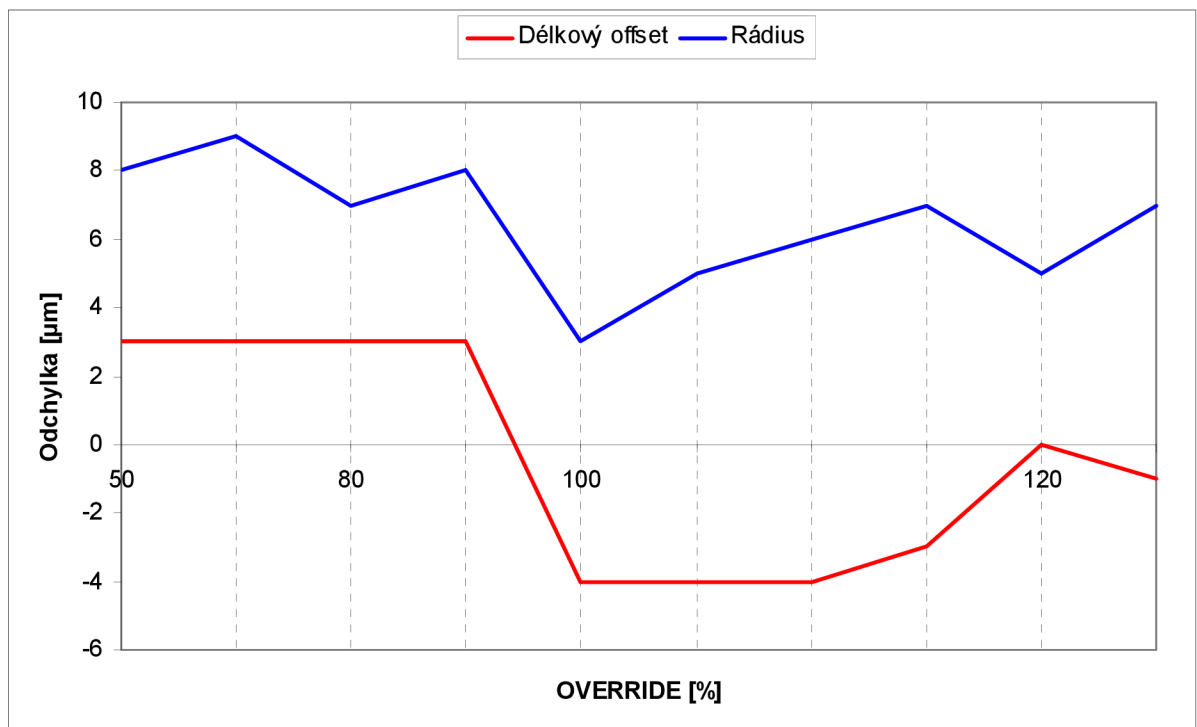
Skutečné rozměry:

Délkový offset = 145.390 mm

Rádus = 15.310 mm

OVERRIDE [%]	Číslo měření	Sondou naměřené hodnoty [mm]		Chyba [μm]	
		Délkový offset	Rádus	Délkový offset	Rádus
50	1	145,393	15,318	3	8
	2	145,393	15,319	3	9
80	3	145,393	15,317	3	7
	4	145,393	15,318	3	8
100	5	145,386	15,313	-4	3
	6	145,386	15,315	-4	5
	7	145,386	15,316	-4	6
	8	145,387	15,317	-3	7
120	9	145,390	15,315	0	5
	10	145,389	15,317	-1	7

Tab. 4.16 Měření čelní válcové frézy.



Graf 4.7 Vliv špatného nastavení měřicí rychlosti na přesnost měření sondy NC4S.

Vyhodnocení testu:

Pokud se nastaví jiná rychlost měření, než na jakou je sonda zkalibrována, dochází k chybě měření. Stejně jako u obrobkové sondy, je tato chyba způsobena špatným výpočtem skutečné dráhy za dobu reakce řídicího systému. Jelikož je ale posuv při snímání velmi malý, tak se tato chyba na naměřených hodnotách nijak zvlášť neprojeví (o to je nebezpečnější).

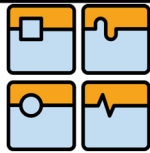
Naměřené hodnoty se oproti měření na specializovaném pracovišti pro měření nástrojů liší, protože se měřilo při skutečných obráběcích otáčkách a k naměřenému průměru a délce nástroje se tak přidalo ještě čelní a obvodové házení vřetena.

4.6 Porovnání struktury vedlejších výrobních časů při použití obrobkové sondy a bez ní

Jelikož již nadále nebyla možnost testovat ustavení na stroji FRFQ 250 (stroj byl exportován), přesunuli jsme se na stroj FOQ80 s automatickou výměnou nástroje a otočným stolem (viz obr. 4.6.1 a také obr. 3.4) a tam jsme provedli porovnání doby ustavení, při použití obrobkové sondy RMP 60 a ručně.



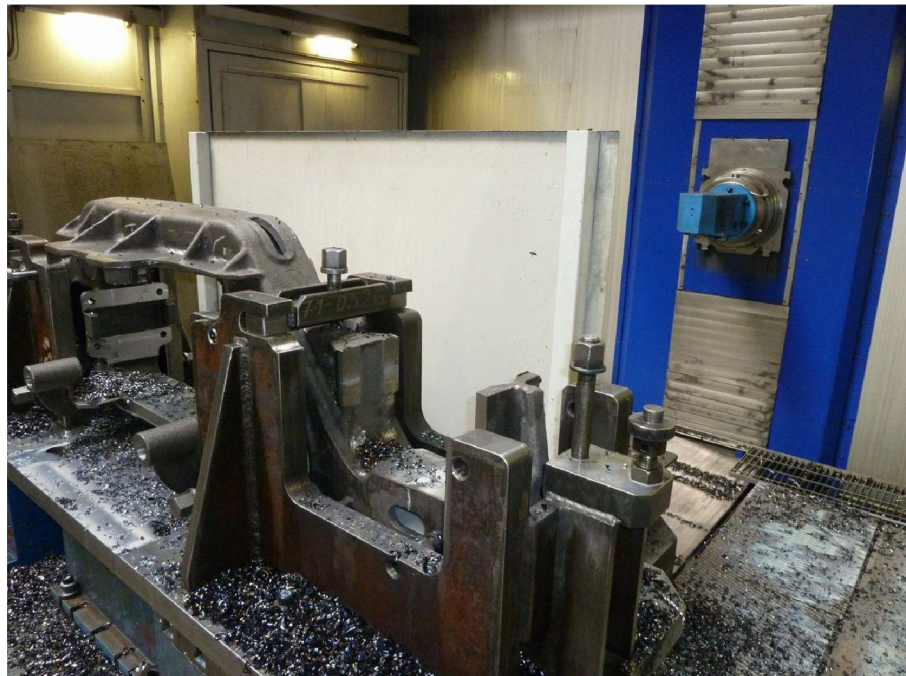
Obr. 4.14 Horizontální obráběcí centrum FOQ 80 s automatickou výměnou nástrojů a otočným stolem. [22]



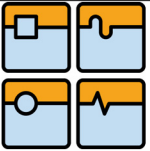
4.6.1 Průměrný čas upnutí a vyrovnání testovacího kusu ručně a se sondou

Ustavovaný kus:

Kus, který se bude na tomto stroji sériově vyrábět slouží jako část podvozku nákladního vagonu. Konkrétně jde o obrobení funkčních ploch a otvorů na odlitku (viz. obr. 4.15). Polotovar se bude sondou pouze ustavovat. Rozměry se budou kontrolovat na souřadnicovém měřicím stroji. Měření tedy nezasahuje do samotného výrobního procesu. K ustavení sondou se použije hlava VP14 (na obrázcích). Tento kus se nevyrovnává pouze se měří správná poloha středu, je použit upínací přípravek a upínač, vyrovnaný na drážky stolu. Pouze se uloží, utáhne a rozměří (obr. 4.16). Stroj je vybaven otočným stolem, takže se odlitek bude odebírat a upínat během automatického chodu stroje.

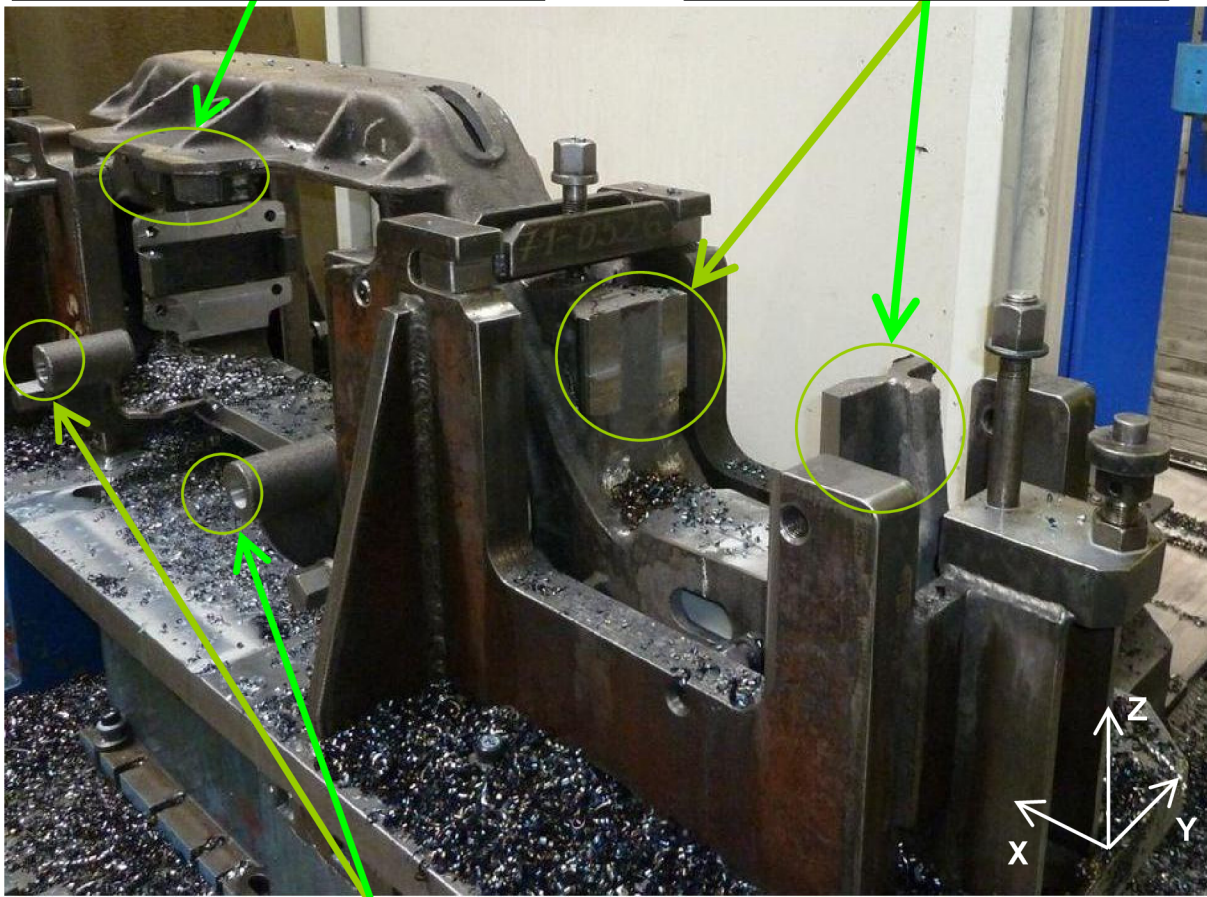


Obr. 4.15 Ustavovaný kus včetně upínacího přípravku, použitého při obrábění.
[22]



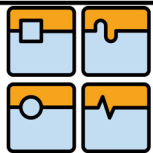
2) Na tuto plochu zevnitř se nastavuje nulový bod v ose Y v záporném směru.

1) Změří se tyto plochy na obou stranách. Výsledkem je nastavení středu polotovaru v ose X.



3) Změří se oba otvory, pomocí 3 bodů se vypočítá jejich střed. Tím se zjistí odchylka od nulového bodu použitá při obrábění (tolerance polohy děr v X a Y je 3 mm).

Obr. 4.16 Postup při rozměřování polotovaru. [upraveno dle 22]

**Ručně:**

- 1) Rozměření polotovaru v osách X, Y a nastavení nulových bodů pomocí úchylkoměru, upíná se na čelo obráběcí hlavy pomocí magnetického stojánku se stahovací objímkou.
- 2) nastavení nulových bodů ručně na panelu stroje
- 3) zavolání nástroje ze zásobníku
- 4) obrábění
- 5) otočení stolu a opakování operace
 - ve volném čase během automatického chodu stroje odebrání kusu z druhého přípravku a přichystání nového kusu do přípravku.

Doba ustavení 1 kusu

Odhad: 25 min.

Tab. 4.15 Ustavení polotovaru ručně.

*Pozn.: Odhad provedl pracovník, který dříve než se začaly používat obrobkové sondy ustavoval téměř stejné kusy ručně.

Obrobková sonda RMP 60:

- 1) Zavolání sondy ze zásobníku nástrojů
- 2) rozměření polotovaru v osách X, Y a automatické nastavení nulových bodů
- 3) odeslání sondy zpět do zásobníku a výměna za obráběcí nástroj
- 4) obrábění
- 5) otočení stolu a opakování operace
 - ve volném čase během automatického chodu stroje odebrání kusu z druhého přípravku a přichystání nového kusu.

Doba ustavení 1 kusu

Doba při automatickém ustavení sondou RMP 60 3 min.

Tab. 4.16 Ustavení polotovaru pomocí obrobkové sondy RMP 60.

*Pozn.: 3 min je délka chodu programu sondy vyčtená z panelu stroje včetně doby výměny nástrojů (přesněji je to 2 min 53 vteřin).

4.6.2 Vliv použití obrobkové sondy na strukturu vedlejších výrobních časů:

Pro výpočet vedlejších výrobních časů je nutné si zvolit následující parametry.

Počet směn: $P_{sm} = 2$
 Počet hodin za směnu: $h = 8$ hod
 Nevyhnutelné časové ztráty: $z = 2$ %
 Počet ustavení za hodinu: $u = 0,92$ hod⁻¹

Jedna součást se vyrábí 40 min tzn. i s ustavením to bude 65 min.

Z toho počet ustavení za hodinu $u = \frac{60}{65} = 0,92$.

Úspora času při 1 upnutí s použitím sondy RMP 60:

$$t_{u1} = t_{r1} - t_{s1} = \frac{25 - 3}{60} = 0,366 \text{ hod} \quad (4.10)$$

Kde: t_{u1} – uspořený čas při použití sondy RMP 60
 t_{r1} – čas ručního ustavení obrobku
 t_{s1} – čas ustavení obrobku pomocí sondy

Výpočet pracovních dnů v roce 2011:

Dní v roce: $d_r = 365$ dnů
 Soboty a neděle: $d_{sn} = 105$ dnů
 Státní svátky, které nejsou v sobotu a v neděli: $d_{ss} = 7$ dnů

$$d_{pr} = d_r - d_{sn} - d_{ss} \quad (4.11)$$

$$d_{pr} = 365 - 105 - 7 = \underline{\underline{253}} \text{ dnů}$$

Kde: d_{pr} – počet pracovních dnů

Výpočet efektivního časového fondu pracoviště za rok:

$$F_{ef} = d_{pr} \cdot h \cdot \sigma \cdot \left(1 - \frac{z}{100}\right) \quad [19] \quad (4.12)$$

$$F_{ef} = 253 \cdot 8 \cdot 2 \cdot \left(1 - \frac{2}{100}\right) = \underline{\underline{3967}} \text{ hod} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Z toho:

- 10% údržba stroje a ostatní činnosti.

$$T_U = F_{ef} \cdot 0,1 \quad (4.13)$$

$$T_U = 3967 \cdot 0,1 = \underline{\underline{396,7}} \text{ hod} \cdot \text{rok}^{-1}$$

- Zbýlý čas se rozdělí mezi samotné obrábění a vedlejší výrobní časy.



Čas strávený ustavováním obrobku ručně:

$$T_{u,R} = (t_{r1} \cdot u) \cdot (F_{ef} - T_U) \quad (4.14)$$

$$T_{u,R} = \left(\frac{25}{60} \cdot 0,92\right) \cdot (3967 - 396,7) = 1368,5 \text{ hod} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Čas strávený ustavováním obrobku se sondou:

$$T_{u,S} = (t_{s1} \cdot u) \cdot (F_{ef} - T_U) \quad (4.15)$$

$$T_{u,S} = \left(\frac{3}{60} \cdot 0,92\right) \cdot (3967 - 396,7) = 164,2 \text{ hod} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Počet hodin samotného obrábění bez použití sond ročně:

U ručního je započteno ještě 1 % zmetků vzniklých špatným upnutím nebo měřením.

$$T_Z = F_{ef} \cdot 0,01 \quad (4.16)$$

$$T_Z = 3967 \cdot 0,01 = 39,67 \text{ hod} \cdot \text{rok}^{-1}$$

$$T_{ob,R} = F_{ef} - T_U - T_{um,R} - T_Z \quad (4.17)$$

$$T_{ob,R} = 3967 - 396,7 - 1368,5 - 39,67 = 2162,1 \text{ hod} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Počet hodin samotného obrábění při použití sond ročně:

$$T_{ob,S} = F_{ef} - T_U - T_{um,S} \quad (4.18)$$

$$T_{ob,S} = 3967 - 396,7 - 164,2 = 3406 \text{ hod} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Roční úspora času v hodinách, při použití obrobkové sondy RMP60:

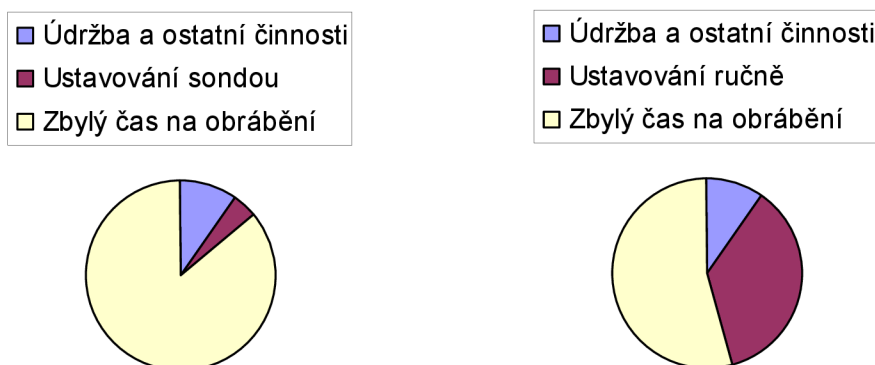
$$R_U = T_{ob,S} - T_{ob,R} \quad (4.19)$$

$$R_U = 3406 - 2166,1 = 1239,9 \text{ hod} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Ročně, v hodinách	Obrobková sonda RMP 60	Ručně
Provozní hodiny	3967	3967
Prostoje na údržbu a jiné činnosti (10% z provozu)	396,7	396,7
Ustavování obrobku (0,92 x za hodinu)	164,2	1368,5
Čas strávený výrobou zmetků (1%)	-	39,67
Zbýlý čas na obrábění	3406,1	2162,1
Roční úspory času při ustavování sondou	1240 hodin	

Tab. 4.17 Porovnání struktury vedlejších výrobních operací.

Z tab. 4.17 je vidět že roční úspory času při použití obrobkové sondy RMP 60 jsou 1240 hodin ročně, což je 31% z celkového provozu. Doba ustavování součásti se snížila o 88%.



Graf 4.8 Struktura hlavních a vedlejších výrobních operací s použitím sondy (vlevo) a při ručním ustavování (vpravo).



4.7 Ekonomické zhodnocení obrobkové sondy

Roční úspory na stroji:

Úspory jsou spočteny vzhledem k hodinové sazbě stroje. Tzn., že ve volném čase, který se uspoří oproti ručnímu ustavování, se stroj vypne.

$$\begin{aligned} \text{Hodinová sazba stroje:} & S_h = 1500 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1} \\ \text{Uspořený počet hodin ročně při} \\ \text{použití obrobkové sondy RMP60:} & R_c = 1240 \text{ hod} \\ R_{U,S} &= R_c \cdot S_h \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$R_{U,S} = 1240 \cdot 1500$$

$$R_{U,S} = 1240 \cdot 1500 = 1860000 \text{ Kč}$$

Doba návratnosti investice do obrobkové sondy

Cena sondy RMP60, včetně baterií

a montážního náradí: $C_S = 128\,500 \text{ Kč}$.

Cena přijímače RMI včetně příslušenství: $C_P = 81\,000 \text{ Kč}$.

Cena školení obsluhy a instalace zařízení: $C_\xi = 30\,000 \text{ Kč}$.

Do ceny se nezapočítává cena softwaru od Renishaw (postačí cykly řídicích systém; iNC530 nebo Sinumeruk 840D), která je 17 000 Kč. Lithiové baterie vydrží 4800 hodin nepřetržitého chodu, při 5% použití (tj. 72 min denně) postačí tedy pouze jedny.

$$N = \frac{C_S + C_P + C_\xi}{R_S} \quad (4.21)$$

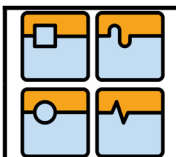
$$N = \frac{128500 + 81000 + 30000}{1860000} = \frac{239500}{1860000} = 0,1287 \text{ let} = 1,54 \text{ měsíce}$$

Z uvedeného propočtu je zřejmé, že použití obrobkové sondy na tuto aplikaci bude velmi výhodné.

Informativně uvádím i cenu testovaného systému NC4S pro měření nástroje:

- Nástrojová sonda NC4S:	152 000 Kč
- Příslušenství k sondě NC4S:	10 000 Kč
- Software pro sondu:	17 000 Kč
- Práce (instalace a školení):	30 000 Kč

Celkem: 209 000 Kč.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 80
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

5. ZÁVĚR

První část práce se skládá z rešerše o použití obrobkových a nástrojových sond na CNC obráběcích centrech. Popisuje jednotlivé úkony měření, ke kterým se mohou sondy použít a výhody s nimi spojené. Jsou zde uvedena různá konstrukční provedení těchto sond.

Obrobkové sondy jsou rozděleny jak z hlediska přenosu signálu do řídicího systému (kabelem, infračervený optický a rádiový přenos), tak i z hlediska senzorů s jakými pracují (tlakové, optické, tenzometrické, atd.). Tato část se také zabývá příslušenstvím těchto sond (nástrojové držáky, vyměnitelné doteky) a pravidly pro vhodný výběr materiálu a typu dotyku.

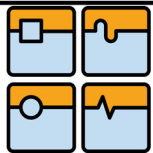
U sond nástrojových rozlišujeme systémy z hlediska fyzikálního principu měření (kontaktní, bezkontaktní, kombinované) a z hlediska operací, ke kterým slouží (pouze k měření, pouze k detekci poškození nástroje a kombinované).

Oba typy sond mohou být řízeny buďto ručně, nebo programově. Záleží pouze na sériovosti aplikace, ke které se použijí. Ručně se ovládají sondy v kusové výrobě, programově při hromadné výrobě. Velmi důležitým úkonem před začátkem měření je správná kalibrace sond.

Další část se zabývá výběrem vhodných obrobkových a nástrojových sond pro jednotlivé typy univerzálních obráběcích strojů z produkce firmy TOS Kuřim-OS. Konkrétně jde o portálová centra s pevným nebo posuvným portálem, ložová centra, horizontální centra s pevným rámem a centra s posuvným stojanem.


V poslední části je testován navržený měřicí systém, použitý pro portálové CNC frézovací centrum FRFQ 250, skládající se z rádiové obrobkové sondy Renishaw RMP60 a dělené laserové nástrojové sondy Renishaw NC4S, včetně vyhodnocení dosahované přesnosti. Jsou zde testovány některé charakteristické vlastnosti obrobkové sondy RMP 60 (vliv rychlosti snímání na přesnost měření, chování inkrementálního odměřovacího systému). Dále jsme testovali hodnotu reprodukovatelnosti měření nástrojovou sondou NC4S při rozestupu 200 mm. Jednotlivá měření byla nejdříve náležitě naprogramována. Poté byla realizována, zapsána ve formě protokolů o jednotlivých měřeních a dále statisticky zpracována včetně vyhodnocení jednotlivých testů.

Obrobkové sondy jsou velmi dobrým nástrojem pro zkrácení nevýrobních časů (ustavování a měření) i na velkých strojích z produkce TOS Kuřim. A to především tam kde se ustavují nejrůznější tvarově složité polotovary (např. odlitky k obrobení funkčních ploch), jejichž ustavení je ručně pomocí úchytko-oměru velmi zdlouhavé a náročné. Lze je použít i v případě měření součástí po nebo v průběhu obrábění. Musí se však vzít ohled na požadovanou jakost výroby. Také nástrojové sondy zlepšují kvalitu celého obráběcího procesu, tím že pravidelně korigují délkové a průměrové opotřebení nástroje. V kombinaci s automatickou výměnou obrobku lze s jejich pomocí automatizovat obrábění většiny běžných součástí.

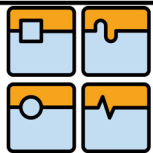


6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] Webové stránky Renishaw s.r.o. [online]. [cit. 2011-03-30].
Dostupné z: <<http://www.renishaw.cz/>>.
- [2] Webové stránky Heidenhain s.r.o. [online]. [cit. 2011-03-30].
Dostupné z: <<http://www.heidenhain.cz/>>.
- [3] Webové stránky Marposs s.r.o. [online]. [cit. 2011-03-30].
Dostupné z: <<http://www.marposs.com>>.
- [4] Webové stránky Blum-Novotest s.r.o. [online]. [cit. 2011-03-30].
Dostupné z: <<http://www.blum-novotest.com/>>.
- [5] Webové stránky firmy TOS Kuřim – OS, a.s. [online]. [cit. 2011-03-30].
Dostupné z: <www.tos-kurim.cz>.
- [6] Prospekt fy Heidenhein. *Sondy měření obrobků a nástrojů*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <http://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/208_951-C1.pdf>.
- [7] Brožura Renishaw: *Řešení – zlepšete kvalitu a přesnost součástí a zvýšte efektivnost vašeho obráběcího centra*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <<http://www.renishaw.cz/cs/sondy-k-obrabecim-strojum-pro-nastaveni-a-kontrolu-obrobku--6075#ElementMediaList11384>>.
- [8] Manuál siemens: *Sinumerik 840D/840Di/810D/FM-NC - Příručka uživatele: Cykly měření (BNM)*. Vydání 06.00. [cit. 2011-03-30]. Dostupné na přiloženém DVD.
- [9] Katalog fy Renishaw: *Doteky a příslušenství*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <<http://www.renishaw.cz/cs/doteky-k-dotykovym-sondam--6333>>.
- [10] POLZER, A. *Příklady úloh CNC obrábění, díl 21. - Obrábění & měření. Technický týdeník*, 2009. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-03-30]. dostupný z: <http://www.techtydenik.cz/priklady_cnc.php>.
- [11] POLZER, A. *Příklady úloh CNC obrábění, díl 24. – Integrace měření do procesu třískového obrábění, Technický týdeník*, 2009. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <http://www.techtydenik.cz/priklady_cnc.php>.
- [12] SLÁMA, J. *Systémy pro kontrolu nástrojů, MM Spektrum: Trendy/ obrábění*. [online]. 2005, č.12, s. 48. ISSN 1212-2572. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <www.mmspektrum.com/clanek/systemy-pro-kontrolu-nastroju>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 82
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [13] Katalogový list fy Renishaw: *RMP 60 – Rádiová sonda pro obráběcí stroje*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <<http://www.renishaw.cz/cs/rmp60-dotykova-sonda--6100#ElementMediaList13315>>
- [14] Informace z konzultací ve firmě TOS Kuřim – OS, a.s.
- [15] Informace z exkurze ve firmě Renishaw, Olomoucká 2, Brno.
- [16] Katalogový list fy Renishaw. *Vysoce přesná optická strojní sonda OMP 400*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <<http://www.renishaw.cz/cs/omp400-kompaktni-vysoce-presna-dotykova-sonda--6089#ElementMediaList12677>>
- [17] Katalogový list fy Renishaw. *Bezkontaktní systém ustavování nástrojů NC4*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <<http://www.renishaw.cz/cs/nc4-bezkontaktni-system-nastavovani-nastroju-pomoci-laseru--6099#ElementMediaList14372>>
- [18] JANIGA, I. GARAJ, I. *Použití statistických tolerančních intervalů v řízení kvality*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-05-20]. Dostupné z: <<http://www.statspol.cz/request/request2006/sbornik/janiga.pdf>>
- [19] *Vyrobní kapacita*. [PPT prezentace]. [online]. [cit. 2011-05-17]. Dostupné z: <<http://docs.google.com/viewer>>
- [20] Příručka programování Renishaw. *Programing guide: Non-contact tool setting software for Siemens 810D, 840D and FMNC controls with software version 5 or higher*. Dostupné na přiloženém DVD.
- [21] SKOPAL, M. *Kalibrace a zkouška měřidel a měřících systémů*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-05-17]. Dostupné z: <[http://www.mzds.cz/108_Kalibrace & test CMM.pdf](http://www.mzds.cz/108_Kalibrace_%20a%20test_CMM.pdf)>
- [22] Fotografie obráběcích strojů a měřících sond, včetně screenshotů obrazovky stroje FRFQ 250 pořízené ve firmě TOS Kuřim – OS, a.s.
- [23] Webové stránky firmy M&H s.r.o. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z: <<http://www.mh-inprocess.com/>>
- [24] *Katalog portálových strojů* firmy TOS Kuřim – OS, a.s. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-05-17]. Dostupné z: <<http://www.tos-kurim.cz/ke-stazeni/>>
- [25] POSPÍŠIL, M. *Slovník VIM3 – poznámky k překladu do češtiny*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2011-05-17]. Dostupné z: <http://www.mzds.cz/P05_Pospisil.pdf>

**POUŽITÉ SYMBOLY:**

Označení	Jednotka	Název
s	[mm]	Dráha, kterou sonda urazí po sepnutí
v	[mm·s ⁻¹]	Rychlost snímání
t	[s]	Doba odezvy řídicího systému na spínací signál
b	[mm·s ⁻²]	Brzdné zrychlení
D _s	[mm]	Maximální chyba polohování stroje
P(L)	[mm]	Polohová úchylka stroje v závislosti na poloze
A, B, C	[-]	Konstanty
L	[mm]	Poloha
n	[-]	Počet měření
i	[-]	Číslo měření
\bar{x}	[μm]	Střední hodnota
σ	[μm]	Směrodatná odchylka
$P_{\pm 3\sigma}$	[μm]	Oboustranný interval statistické tolerance $\pm 3\sigma$
R	[μm]	Variabilita naměřených údajů
P _{sm}	[-]	Počet směn
h	[hod·směna ⁻¹]	Počet hodin za směnu
z	[%]	Nevyhnutelné časové ztráty
u	[hod ⁻¹]	Počet ustavení za hodinu
t _{u1}	[hod]	Úspora času při ustavení sondou
t _{r1}	[hod]	Čas ručního ustavení polotovaru
t _{s1}	[hod]	Čas ustavení polotovaru pomocí sondy
d _{pr}	[den]	Počet pracovních dnů
d _r	[den]	Počet dní v roce
d _{sn}	[den]	Soboty a neděle
d _{ss}	[den]	Státní svátky
F _{ef}	[hod·rok ⁻¹]	Fektivní časový fond pracoviště
T _u	[hod·rok ⁻¹]	Čas spotřebovaný na údržbu stroje a ostatní činnosti
T _{ob,R}	[hod·rok ⁻¹]	Zbylý čas pro samotné obrábění při ustavování ručně
T _{ob,S}	[hod·rok ⁻¹]	Zbylý čas pro samotné obrábění při ustavování sondou
T _{u,R}	[hod·rok ⁻¹]	Čas strávený ustavováním obrobku ručně
T _{u,S}	[hod·rok ⁻¹]	Čas strávený ustavováním obrobku
R _u	[hod·rok ⁻¹]	Roční úspora času
R _č	[hod·rok ⁻¹]	Uspořený počet hodin ročně při použití obrobkové sondy RMP60
S _h	[Kč·hod ⁻¹]	Hodinová sazba stroje
C _s	[Kč]	Cena obrobkové sondy RMP 60
C _p	[Kč]	Cena rádiového přijímače

Cs

[Kč]

Školení obsluhy a instalace
zařízení

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|-----------|--|
| Příloha 1 | Program použitý pro měření obrobkovou sondou RMP 60 (cykly měření Sinumerik 840D). |
| Příloha 2 | Program použitý pro měření nástrojovou sondou NC4S (cykly měření Renishaw). |
| Příloha 3 | Hodnoty získané opakovaným měřením sondou RMP 60 na kalibrech o \varnothing 175,032 a 125,017 mm při různých rychlostech (pro režim monočidla a multičidla). |