

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

MĚŘENÍ OBROBKŮ NA OBRÁBĚCÍCH STROJÍCH POMOCÍ OBROBKOVÉ SONDY

MEASUREMENT OF WORKPIECES ON MACHINE TOOLS USING A TOUCH PROBE

DIPLOMOVÁ PRÁCE MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. Samuel Velič

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

BRNO 2020



Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
Student:	Bc. Samuel Velič	
Studijní program:	Strojní inženýrství	
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty	
Vedoucí práce:	Ing., DiplIng Michal Holub, Ph.D.	
Akademický rok:	2019/20	

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:

Měření obrobků na obráběcích strojích pomocí obrobkové sondy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je navrhnout a ověřit postup pro stanovení způsobilosti měření obrobků na CNC obráběcích strojích. Díky využití běžně dostupných komponent jako je obrobková, či nástrojová sonda zajistit rychlé a spolehlivé měření.

Toto téma diplomové práce je podpořeno projektem "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008404 prostřednictvím Operačního programu výzkum, vývoj, vzdělávání (2014 – 2020) a spolufinancováno Evropskou unií.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu používané měřicí techniky. Systémový rozbor problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu. Pro navržený postup naplánovat experiment. Statistické zpracování a vyhodnocení výsledku experimentu. Vlastní závěry popisující vhodnost nasazení navrženého postupu.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018. Speciální vydání. Dostupný z WWW: . ISBN 978-80-906310-8-3.

WECK, M., BRECHER, Ch. Werkzeugmaschinen : Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1. Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá vplyvom elektronickej kompenzácie na presnosť merania pri použití obrobkovej sondy. Teoretická časť sa zaoberá obrobkovími sondami, konkrétne ich členením, princípmi fungovania a aplikáciami. Sú v nej taktiež rozobrané prístroje použité v pokuse. Sú nimi double ballbar, laser interferometer a LaserTRACER. V praktickej časti je popísaný pokus demonštrujúci závislosť spresnenia sondy na stupni elektronickej kompenzácie. Všetky merania v pokuse prebiehali v súlade s normou VDA 5 a boli vyhodnotené prostredníctvom programu Matlab. Výstupom skriptu v Matlabe sú grafy závislosti tolerancie spôsobilosti merania na dĺžke etalónu. Na konci tejto práce sú na základe vygenerovaných grafov vyvodené čiastkové závery, ktoré prehľadne porovnávajú vplyv jednotlivých konfigurácií stroja na presnosť sondy.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the influence of electronic compensation on accuracy of the measurement using the touch probe. The theoretical part concerns touch probes, specifically their classification, principles of working and applications. This part also includes devices used later in the experiment, particularly double ballbar, laser interferometer and LaserTRACER. The Practical part describes an experiment, demonstrating the correlation between the accuracy improvement of the touch probe and the electronic compensation's level. All measurements were executed in accordance with the norm VDA 5 and were evaluated by the Matlab software. The graphs of reliance tolerance of capability of measurement on the length of the benchmark. At the end of this diploma thesis there are partial conclusions deduced. The deduction is based on generated graphs. The partial conclusions synoptically compare the influence of individual machine's configurations on the accuracy of the touch probe.

KLÍČOVÁ SLOVA

obrobková sonda, elektronická kompenzácia, geometrická presnosť stroja, volumetrická presnosť stroja, double ballbar, laser interferometer, LaserTRACER

KEYWORDS

touch probe, electronic compensation, geometric accuracy of machine, volumetric accuracy of machine, double ballbar, laser interferometer, LaserTRACER

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VELIČ, S. *Meranie obrobkov na obrábacích strojoch pomocou obrobkovej sondy*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2020, 91 s., Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Táto téma diplomovej práce je podporená projektom "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008404 prostredníctvom operačného programu výskum, vývoj, vzdelávanie (2014-2020) a spolufinancovaná Európskou úniou. Rád by som tiež veľmi pekne poďakoval môjmu vedúcemu práce Ing., Dipl.-Ing Michalovi Holubovi, Ph.D. za jeho cenné rady a ochotu viesť ma pri vypracovávaní tejto práce. Tiež by som sa chcel poďakovať Ing. Jiřímu Tůmovi, Ph.D. a Ing. Tomášovi Marekovi, Ph.D. za asistenciu pri získavaní dát dôležitých pre prácu. Moje poďakovanie samozrejme patrí aj mojim rodičom, ktorí mi po celú dobu vytvárali podmienky vhodné k štúdiu a vždy mi boli oporo

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 22.6.2020

OBSAH

1	ÚV	OD	15
2	MO	TIVÁCIA	17
3	TEĆ	ÓRIA OBROBKOVÝCH SOND	19
3.	1 Č	Členenie obrobkových sond	19
	3.1.1	Rozdelenie podľa konštrukcie	19
	3.1.2	Rozdelenie podľa spôsobu prenosu informácií medzi sondou a riadiacim	
		systémom	21
3.	2 2	Základné časti obrobkovej sondy	21
	3.2.1	Dotykové teleso	21
	3.2.2	Materiály dotykových telies	24
	3.2.3	Stopka dotyku:	25
	3.2.4	Upínacie mechanizmy	25
3.	3 A	Aktuálne riešená problematika v oblasti obrobkových sond	25
	3.3.1	Chyba zopnutia obvodu	25
	3.3.2	Chyba spôsobená deformáciou stopky	26
	3.3.3	Chyba spôsobená deformáciou dotykového telieska	26
	3.3.4	Chyba oneskorenia sondy	26
•	3.3.5	Hysterézia kinematických sond	26
4	OBI	ROBKOVÉ SONDY V PRAXI	29
4.	1 V	/šeobecné aplikácie obrobkových sond	29
	4.1.1	Diagnostika rozmerov hotového obrobku	29
4	4.1.2	Priebežná kontrola pri obrábaní	29
4	4.1.3	Určenie nulového bodu operácie	29
4.	2 F	Konkrétne aplikácie obrobkových sond	29
	4.2.1	Meranie rovinných plôch	29
4	4.2.2	Meranie valcových plôch	30
4	4.2.3	Meranie uhlov	30
5	ANA	ALÝZA GEOMETRICKEJ A VOLUMETRICKEJ PRESNOS	STI
	OBI	RÁBACIEHO STROJA	31
5.	1 I	Double ballbar	31
	5.1.1	Princíp fungovania DBB	31
	5.1.2	Kalibrácia ballbaru	32
5.	2 I	Laser interferometer	32
	5.2.1	Princíp fungovania LI	32
	5.2.2	Softvér CARTO	34
5.	3 I	LaserTRACER	35
	5.3.1	Princíp fungovania LTC	35
	5.3.2	Trac-Check	36
	5.3.3	Trac-Cal	36
6	NÁV	VRH A VYHODNOTENIE EXPERIMENTU	37
6.	1 I	Demonštrátor	37
6.	2 U	Jstavenie prípravku	38
	6.2.1	Chyba merania spôsobená nedokonalým ustavením prípravku	38
	6.2.2	Ustavenie vo výške 130 milimetrov	44
	6.2.3	Ustavenie vo výške 295 mm	45

6.2.4 Ustavenie v osi z	45
6.3 Kalibrácia sondy	46
6.4 Nastavenie merania obrobkovou sondou a postup získania dát	46
6.5 Merania dĺžok etalónov	50
6.5.1 Stroj s vypnutými kompenzáciami	50
6.5.2 Kompenzácia polohy	52
6.5.3 Kompenzácia kolmostí a následne polohy	57
6.5.4 Kompenzácia pomocou LTC	64
6.6 Vyhodnotenie spôsobilosti merania	67
6.6.1 Teória štatistického spracovania podľa noriem	67
6.6.2 Štatistické spracovanie dát z kapitoly 6.4 a čiastkové závery	70
7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA	75
 7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA 8 ZÁVER 	75 77
 7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA 8 ZÁVER 9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV 	75 77 79
 7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA	75 77
 7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA	



1 ÚVOD

Pri obrábaní presných komponentov s vyššou pridanou hodnotou je v dnešnej dobe využitie obrobkovej sondy prakticky samozrejmosťou. Sú to zariadenia, ktoré slúžia diagnostiku polotovarov aj hotových komponentov. Používajú sa napríklad na nájdenie nulového bodu operácie, zistenie finálneho úberu pri dokončovaní či diagnostike rozmerov finálneho komponentu. U sústruhov bývajú uložené v nástrojovej hlave a u frézok sa vkladajú priamo do vretena. Ich vývoj je závislý na vývoji procesorov (resp. na ich výpočtovom výkone) a na vývoji čidiel, ktoré sú v nich použité. Sú schopné pracovať v automatickom cykle. Použitie sondy môže v niektorých prípadoch znížiť čas na ustavenie obrobku o celé rády. Tiež znižuje počet zásahov operátora do procesu, vďaka čomu klesá riziko chyby spôsobenej ľudským faktorom. Obrobkové sondy razantne zvyšujú efektivitu obrábania, predstavujú transparentnosť a zjednodušenie pri obrábaní a do určitej miery môžu znižovať požiadavky na kvalifikáciu operátora. Tento fakt je pri súčasnom trende nedostatku kvalifikovaných pracovníkov v strojárskom odvetví veľkou výhodou.

Skladajú z veľmi presne opracovaných komponentov (hlavne gulička dotyku). Dokážu teda pracovať s veľmi priaznivou opakovateľnosťou. Jej hodnota bežne sa bežne pohybuje rádovo v mikrometroch respektíve desatinách mikrometru. Táto opakovateľnosť je závislá najmä na chybe spôsobenej zlou geometriou sondy, tuhosťou jej komponentov či oneskorenou odozvou riadiaceho systému. Na celkovej chybe merania (a teda na chybe polohovania vretena či nástrojovej hlavy) má však vo väčšine prípadov majoritný podiel zlá geometria stroja (hlavne vedení). Za účelom spresnenia obrábania býva tento druh chyby eliminovaný pomocou rôznych druhov elektronickej kompenzácie.

Táto práca sa zaoberá tým, aký vplyv bude mať elektronická kompenzácia nie na výrobnú presnosť, ale na presnosť obrobkovej sondy použitej ako meradlo. V práci bolo na stroji vykonaných niekoľko typov elektronickej kompenzácie o rôznej zložitosti. Následne boli použité získané konfigurácie pri premeraní sady etalónov. Tie boli ustavené v rôznych polohách a orientáciách. Pokus bol dostatočne obsiahly, aby bolo možné na jeho základe potvrdiť, či vyvrátiť hypotézu, že existuje korelácia medzi stupňom elektronickej kompenzácie stroja a presnosťou obrobkovej sondy.

Všetky merania prebiehali s minimálnymi tepelnými výkyvmi na trojosej frézke MCV 754 QUICK od firmy Kovosvit. Stroj sa nachádzal v laboratóriu Ústavu výrobných strojov, systémov a robotov spadajúci pod Fakultu strojního inženýrství na VUT.



2 MOTIVÁCIA

V súčasnej dobe si mnoho užívateľov obrobkových sond mylne zamieňa hodnotu opakovateľnosti sondy za jej presnosť merania, pričom neberú do úvahy chyby geometrie stroja vstupujúce do meracieho systému. Jednou z hlavných úloh tejto diplomovej práce je teda demonštrovať podiel geometrických chýb stroja na meraní pomocou sondy a dokázať, že údaje získané z nej nemusia byť smerodajné.

Úlohou tejto práce je taktiež poukázať na podiel chýb, ktoré môžu byť odstránené pomocou elektronickej kompenzácie a súčasne nájsť spojitosť medzi zložitosť ou elektronickej kompenzácie a presnosť ou sondy. V praxi by mohla táto práca nájsť uplatnenie vo firmách, ktoré sú nútené hromadne merať obrobky mimo stroj. Ak by sa v takej firme po aplikácii postupov z tejto práce ukázalo, že ich stroj sa po použití niektorého druhu kompenzácie stal schopným spôsobilo merať v požadovanej tolerancii, takmer určite by to viedlo k zníženiu nákladov. Daná firma by mohla totiž obrobky merať v automatickom cykle priamo na stroji, čo by viedlo k ušetreniu času potrebnému na manipuláciu s obrobkom, k zníženiu počtu zamestnancov na metrologickom oddelení atď.



3 TEÓRIA OBROBKOVÝCH SOND

3.1 Členenie obrobkových sond

Obrobkové sondy sa dajú triediť z rôznych hľadísk. Neexistuje univerzálny typ sondy pre všetky aplikácie. Výber správnej sondy závisí hlavne na veľkosti a tvare diagnostikovaného telesa.

3.1.1 Rozdelenie podľa konštrukcie

Kinematické sondy

Jedná sa zrejme o najčastejší typ konštrukcie sondy. Ich princíp spočíva v tom, že istý počet valčekov je tlačený pomocou pružinky na podstavu s guličkami (viď obrázok č. 1). Podstava, guličky a valčeky tvoria elektrický obvod, ktorým preteká prúd o určitej hodnote. Dve guličky s valčekom tvoria takzvané kinematické hniezdo. V nezaťaženom stave sondy vytvára pružinka medzi valčekom a guľôčkami istú hodnota Hertzovho tlaku, ktorá deformuje dané telesá. Vďaka tomu vznikajú medzi telesami styčné plochy, ktorých obsah je teda približne známy a v obvode je teda elektrický prúd o známej hodnote (viď obrázok č. 2). Pri zaťažení sondy sa mení hodnota prúdu v obvode. Zmena (úbytok) prúdu je následne

zachytený riadiacim systémom a je teda detekovaný kontakt sondy s obrobkom. Opakovateľnosť kinematických sond je zhruba jeden mikrometer. Tento typ sond nie je vhodné používať pre obrobky obrábané napríklad na päťosích obrábacích centrách, pretože pri diagnostike tvarovo zložitých povrchov môže dôjsť k trojuholníkovej geometrickej chybe.



V nasledujúcej tabuľke môžete vidieť typy kinematických sond vyrábaných spoločnosťou Renishaw spolu s ich základnými charakteristikami.

Názov sondy	Typ stroja	Typ prenosu signálu	Opakovateľnosť [µm]	Maximálna doporučená dĺžka dotyku [mm]
OMP40-2	Malý-stredný	Optický	1	150
OLP40	Sústružnícke centrum	Optický	1	150
OMP60	Stredný-veľký	Optický	1	150
RMP40	Malý-stredný	Rádiový	1	150
RLP40	Sústružnícke centrum	Rádiový	1	150
RMP60	Stredný-veľký	Rádiový	1	150
LP2	Sústružnícke centrum /brúska	Káblový	1	100
JCP	Manuálne riadený stroj	Káblový	1	42,5
Rádiová obrob. sonda PRIMO TM	Stredný-veľký	Rádiový	1	150

Tab 1) Kinematické sondy od spoločnosti Renishaw [1]

Tenzometrické sondy

Sondy tohto druhu sú vybavené niekoľkými tenzometrami (najčastejšie kremíkovými), ktoré sú schopné detekovať zaťaženie vo všetkých smeroch, čím je znížená odchýlka spôsobená trojuholníkovou geometrickou chybou zhruba o 90%[2]. Vďaka nim sú schopné diagnostikovať komponenty obrábané aj na obrábacích centrách s mnohými stupňami voľnosti.



Obr. 3) Princíp tenzometrickej sondy[3]

Opakovateľnosť týchto sond je bežne 1 mikrometer a menej. Sú presnejšie a samozrejme aj drahšie, ako kinematické sondy. V nasledujúcej tabuľke môžete tiež vidieť zoznam tenzometrických sond od firmy Renishaw spolu s ich základnými vlastnosťami.



FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Tab 2) Tenzometrické sondy od spoločnosti Renishaw[4]

Názov sondy	Typ stroja	Typ prenosu signálu	Opakovateľnosť [µm]	Spínacia sila [N]
OMP400	Malé a stredné obrábacie centrá	Optický	1	0,06
OMP600	Stredné až veľké obrábacie centrá	Optický	1	0,015
RMP400	5-osé obrábacie centrá	Rádiový	1	0,09
RMP600 Portálové obrábacie centrá		Rádiový	1	0,2
MP250	Brúsky	Beznapäťové relé	1	0,08

3.1.2 Rozdelenie podľa spôsobu prenosu informácií medzi sondou a riadiacim systémom Obrobkové sondy využívajú vo väčšine prípadov nasledujúce tri typy prenosu údajov[2].

<u>Káblový prenos</u>

Prenos informácií je prevedený pomocou kábla, ktorý zvyčajne zároveň napája sondu. Káblový prenos nie je kvôli kabeláži vhodný pre stroje s automatickou výmenou nástrojov. <u>Optický prenos</u>

Prenos pomocou optiky je bezdotykový a je vhodný v prípade obrábania takých komponentov, kde nedochádza počas obrábania k strate vizuálneho kontaktu medzi sondou a komunikačným modulom. Najčastejšie je na tento prenos používaný infračervený spoj. Optický prenos nie je náchylný na rušenie signálu.

<u>Rádiový prenos</u>

Je bezdotykový prenos. Pokiaľ sa nedá zaistiť stály vizuálny kontakt sondy a komunikačným modulom, tak rádiový prenos funguje ako drahšia alternatíva k optickému prenosu. Rádiové vlny sú schopné prechádzať cez materiál, takže môže komunikačný modul ležať mimo pracovný priestor. Nevýhodou rádiového prenosu je väčšia náchylnosť na rušenie. V prípade rušenia sa sonda automaticky preladí na inú frekvenciu, vďaka čomu môže fungovať ďalej.

3.2 Základné časti obrobkovej sondy

3.2.1 Dotykové teleso

Je to jediná súčiastka sondy, ktorá by sa mala dostať do kontaktu s obrobkom, a preto je to jej najprecíznejšie opracovaná časť. Tolerancie jej opracovania sa môžu pohybovať v desiatkach nanometrov. Môže nadobúdať rôzne tvary a môže byť vyrobená z rôznych materiálov v závislosti od aplikácie či diagnostikovaného materiálu. Je dôležité udržiavať guličku čistú, pretože jej znečistenie sa môže odraziť na zhoršenej presnosti merania. Je výhodné, aby mala čo najväčší možný priemer a to z toho dôvodu, aby znižovala riziko kontaktu stopky dotyku s obrobkom. Môže nadobúdať rôzne tvary. Na vhodnosť tvaru dotykového telesa má vplyv predovšetkým tvar a veľkosť meranej plochy, prípadne tvar a veľkosť celého obrobku. Typy dotykov obrobkových sond sú popísané v nasledujúcich bodoch.

Guľôčkový dotyk

Gulička je schopná diagnostikovať väčšinu plôch, ktoré môžu byť vytvorené klasickým trojosím obrábaním a preto je to najpoužívanejší variant obrobkovej sondy. Vo väčšine prípadov je gulička umiestnená na drieku, ktorý prichádza k ploche pod uhlom 0 alebo 90 stupňov.



Obr. 4) Guľôčkový dotyk sondy[5]

Existuje niekoľko modifikácií guľôčkového dotyku. Jednou z nich je napríklad koncepcia nazývaná hviezdicový dotyk umožňujúci meranie vo viacerých osiach bez toho, aby došlo k výmene sondy alebo naklopeniu vretena (viď obr. č. 5). Pomerne známou aplikáciou je taktiež tzv. kĺbový dotyk(viď obrázok č. 6), ktorý umožňuje sondovanie pod rôznymi uhlami.



Obr. 5) Hviezdicová sonda[6]



Obr. 6) Guličková sonda s kĺbovým spojom[7]



Valcový dotyk

Tento typ dotyku sa využíva na meranie tenkých telies (napr. plechov). Pri použití guľôčkového dotyku na tenké telesá musí stred guličky ležať medzi hornou a dolnou rovinou obrobku, tak ako je to naznačené na obrázku 7. Takéto ustavenie sondy môže byť časovo náročné. Pri nedodržaní tejto podmienky dochádza k vzniku chyby guľôčkovej sondy o veľkosti Δ . Na takéto aplikácie je vhodné použiť valcovú sondu (viď obr. 8), ktorá tento typ chyby eliminuje.



guľôčkovou sondou



Polguľový dotyk

Sondy s polguľovým dotykom sa vyznačujú vyšším polomerom dotykového telesa ako tie s guľôčkovým. Vyšší polomer krivosti znižuje chybu merania spôsobenú nedokonalosťou povrchu a zároveň sprístupňuje sonde niektoré plochy, ktoré by neboli dostupné v prípade použitia guľôčkového dotyku, ako môžete vidieť na obrázku číslo 9.



Obr. 9) Polguľový dotyk sondy[8]

<u>Diskový dotyk</u>

Dotykové teleso je v tomto prípade tvorené jedno guľovou plochou a dvoma rovinnými, pričom práve guľová plocha prichádza do kontaktu s obrobkom. Samotný disk je tenký a pri meraní otvoru zaberá v radiálnom smere podstatne menej priestoru ako hviezdicová sonda. Preto je výhodné ho používať napríklad na meranie vnútorných zápichov v menších otvoroch.



Obr. 10) Diskový dotyk[9]

3.2.2 Materiály dotykových telies

Dotykové telesá si musia zachovávať svoju geometriu a preto sú robené z oteruvzdorných a pevných materiálov. Väčšina dotykových telies je zložená z nasledujúcich troch materiálov [10].

Monokryštalický syntetický rubín

Rubínová gulička sa skladá približne z 99% z oxidu hlinitého (Al2O3). Jedná sa o jeden z najtvrdších materiálov vôbec. Jeho bežná tvrdosť sa pohybuje okolo 1800 HV. Je zrejme najpoužívanejšou koncepciou u obrobkových sond. Je vhodná pre všetky typy materiálov s výnimkou hliníku, keďže samotný oxid hlinitý obsahuje vysoké percento hliníka, čo môže mať za následok adhézny oter. To znamená že pri kontakte guličky s obrobkom dochádza k vytrhávaniu častíc hliníka z obrobku, ktoré sa na ňu prichytávajú a menia jej geometriu a zvyšujú tým chybu merania. Tiež nie je vhodná meranie liatinových obrobkov kvôli ich grafitickej štruktúre, ktorá zanecháva po obrábaní pomerne drsný povrch, ktorý je nevhodný pre častý kontakt s tak presnými komponentmi, ako je dotyková gulička. Nitrid kremíku

Nitrid kremíku (Si3N4) je tiež veľmi tvrdý materiál s približnou tvrdosťou 1600 HV (záleží na spôsobe spracovania). Je vhodný na brúsenie aj leštenie, takže sa dá uňho dosiahnuť veľmi vysokej kvality povrchu. Jeho jedinou závažnou nevýhodou je nízka odolnosť voči oceli. Môže však dobre slúžiť ako alternatíva k rubínovým guličkám, pokiaľ ide o obrábanie hliníku.



<u>Oxid zirkoničitý</u>

Je taktiež veľmi odolný materiál, ktorý sa vlastnosťami takmer vyrovná rubínu. Jeho najväčšou výhodou je, že sa ako jediný z troch spomenutých materiálov sa výrazne neopotrebováva pri kontakte s liatinou a preto sa odporúča pre diagnostiku liatinových obrobkov.

3.2.3 Stopka dotyku:

Je časť obrobkovej sondy, na ktorej je upevnená dotyková gulička. Ohyb stopky sa podieľa na chybe merania. Je preto dôležité, aby bola efektívna dĺžka stopky čo najmenšia. Materiály stopiek bývajú preto tiež už spravidla vyrobené z materiálov, ktoré vynikajú svojou tuhosťou ako napríklad nerezová oceľ, karbid volfrámu, keramika či uhlíkové vlákna.

3.2.4 Upínacie mechanizmy

Obrobkové sondy sa upínajú vo frézkach priamo do vretena. Z tohto dôvodu sú si upínacie mechanizmy fréz a sond veľmi podobné. Na nasledujúcej dvojici obrázkov môžete vidieť príklady takýchto sondových upínačov.



Obr. 11) Sondový upínač HSK od Renishaw[11]

Obr. 12) Sondový upínací kužel DIN od Renishaw[12]

3.3 Aktuálne riešená problematika v oblasti obrobkových sond

Pri používaní obrobkovej sondy je treba brať na zreteľ, že sonda nie je dokonale tuhá a ani presne vyrobená. Prenos signálu zo sondy tiež nie je dokonalý. V tejto kapitole sú teda odvodené matematické modely chýb sondy, ktoré sú v súčasnosti predmetom niekoľkých štúdií.

3.3.1 Chyba zopnutia obvodu

Pružina kinematickej sondy sa po kontakte s obrobkom musí do určitej miery stlačiť, aby prerušila obvod, vďaka čomu je detekovaná prítomnosť obrobku. Táto chyba sa potom premieta do chyby merania sondy. Matematický model tohto stlačenia popísaný v nasledujúcej rovnici[13]:

$$W_{E(\alpha,\beta)} = \frac{2*h_e*\sqrt{\frac{1}{4}*a^2 + L^2}}{3*a}$$
(1)

Kde h_e je axiálne stlačenie pružiny potrebné na prerušenie obvodu, a je vzdialenosť osi stopky sondy od kinematického hniezda a L je dĺžka stopky.

3.3.2 Chyba spôsobená deformáciou stopky

Tento druh chyby je výrazný obzvlášť pri meraní šikmých a vertikálnych plôch. Jedná sa o klasický ohyb stopky vplyvom dotykovej sily, ktorá je potrebná na detekovanie obrobku.

Chyba spôsobená deformáciou stopky je potom vypočítaná pomocou nasledujúceho vzťahu[13]:

$$w_{D(\alpha,\beta)} = c_R * F_T * \sin^2\beta \tag{2}$$

Hodnota C_R je faktor popisujúci tuhosť stopky pri namáhaní na ohyb, F_T je normálová sila od dotyku sondy a β je sklon meranej plochy.

3.3.3 Chyba spôsobená deformáciou dotykového telieska

Pri dotyku sondy a obrobku vzniká medzi týmito dvoma telesami Hertzovo napätie a Herztová deformácia. Tá následne skresľuje nameranú hodnotu. Tú získame z nasledujúceho vzťahu[13]:

$$w_{H(\alpha,\beta)} = A * \sqrt[3]{F_T^2} * \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right)^2 * \left(\frac{2}{D_T} + \frac{1}{R_S}\right)$$
(3)

Hodnota A je konštantou závislou na materiáloch guličky a obrobku, hodnoty E_1 a E_2 sú Youngove moduly pružnosti materiálov guličky a obrobku, D_T reprezentuje priemer meracej guličky a R_S predstavuje zakrivenie meraného telesa (v prípade, že je meraná plocha rovinná, parameter sa rovná nekonečnu a celý zlomok sa rovná nule).

3.3.4 Chyba oneskorenia sondy

Táto chyba je spôsobená oneskorenou odozvou sondy. Jej veľkosť sa určí pomocou nasledujúcej rovnice[13]:

$$w_{I(\alpha,\beta)} = v * \tau \tag{4}$$

Hodnota τ je doba medzi aktiváciou sondového transduktora a vygenerovaním spúšťacieho signálu sondou a *v* predstavuje rýchlosť sondy počas merania.

3.3.5 Hysterézia kinematických sond

Niektoré štúdie sa v súčasnosti zaoberajú javom, kedy sa menia hodnoty merania v závislosti smere merania. Rozdiel medzi hodnotami dvoch meraní v navzájom opačných smeroch sa nazýva hysterézia. V tejto podkapitole bude stručne popísaná hysterézia kinematickej sondy s tromi kinematickými hniezdami. Predpokladá sa, že sa sonda pohybuje vodorovne po priamke prechádzajúcej práve jedným kinematickým hniezdom a stredom sondy. Sily potrebné na spúšťanie sondy sú kvôli konštrukcii sondy v rôznych smeroch odlišné. Na nasledujúcom obrázku je zobrazené meranie sondou, ktorá sa pohybuje smerom od kinematického hniezda k stredu sondy (tento smer je označený ako smer 1).



Obr. 13) Hysterézia v smere 1

Hodnota sily F_S predstavuje silu predopnutia pružiny sondy a hodnota F_I predstavuje silu generovanú pružinou po stlačení. Hodnota a_n reprezentuje vzdialenosť osi stopky od kinematického hniezda (resp. hniezd), na ktoré je vyvíjaný tlak (je meraná v smere pohybu sondy), h_I predstavuje zdvih potrebný na aktiváciu sondy. Hodnota hysterézie v danom smere je H_I a spočíta sa pomocou nasledujúceho vzťahu[14].

$$H_1 = \frac{2 * L * h_1}{a_n} = L * \left(\frac{8 * F_s * f}{3 * k * a_n^2} - \frac{v^2 * m}{k * s * a_n} \right)$$
(5)

V danej rovnici sa predstavuje hodnota *f* koeficient trenia medzi guličkami a valčekom v kinematickom hniezde, hodnota *m* je hmotnosť pohyblivej časti kinematického mechanizmu a hodnota *s* je zdvih potrebný na dosiahnutie kľudovej polohy sondy. Na nasledujúcom obrázku je zobrazená situácia, kedy sa sonda pohybuje opačným smerom (označme ho smer 2).



Obr. 14) Hysterézia v smere 2

Hodnota a_n je v tomto prípade dvakrát väčšia. Analogicky s predchádzajúcou situáciou predstavuje h_2 zdvih potrebný na aktiváciu sond, hysterézia v danom smere je H_2 a spočíta sa pomocou následného vzťahu[14]:

$$H_2 = \frac{L * h_2}{a_n} = L * \left(\frac{F_S * f}{3 * k * a_n^2} - \frac{v^2 * m}{k * s * a_n}\right)$$
(6)

Hodnota celkovej hysterézie je súčet hysterézií v oboch smeroch viď nasledujúca rovnica[14]:

$$H = 3 * L * \left(\frac{F_{S} * f}{k * a_{n}^{2}} - \frac{v^{2} * m}{2 * k * s * a_{n}}\right)$$
(7)



4 OBROBKOVÉ SONDY V PRAXI

4.1 Všeobecné aplikácie obrobkových sond

Obrobkové sondy nachádzajú svoje využitie pred obrábaním, počas obrábania a aj po samotnom obrábaní.

4.1.1 Diagnostika rozmerov hotového obrobku

Jedná sa o kontrolu finálnych rozmerov po obrábaní. Výsledky merania obrobkovej sondy sú však skreslené hlavne chybami lineárnych vedení jednotlivých osí. V prípade obrábania komponentov s vysokou presnosťou sa odporúča použiť iné meracie zariadenia. V nasledujúcich troch bodoch sú popísané tri základné typy meraní[15].

<u>Absolútne meranie</u>

Dochádza priamo k zmeraniu rozmerov komponentu.

<u>Komparačné meranie</u>

Výstupom takéhoto merania je odchýlka od určitého vopred známeho rozmeru.

<u>Tolerančné meranie</u>

Výstupom tohto druhu merania je iba to, či ležia namerané hodnoty v danom tolerančnom poli alebo nie.

4.1.2 Priebežná kontrola pri obrábaní

Používa sa na diagnostiku rozmerov obrobku pred obrábaním na čisto.

4.1.3 Určenie nulového bodu operácie

Pri sériovej produkcií je niekedy dôležité priebežne aktualizovať súradnice nulového bodu niektorých operácií a to z dvoch dôvodov. Prvým je fakt, že každý obrobok má iné rozmery. Druhým je fakt, že pri sériovom obrábaní môže dochádzať k zmene polohy upínania obrobku napríklad vplyvom tepelnej diletácie, vniknutia triesky medzi polotovar a upínací mechanizmus či mechanickej deformácie upínacieho mechanizmu.

4.2 Konkrétne aplikácie obrobkových sond

4.2.1 Meranie rovinných plôch

Zrejme najčastejší spôsob získavania rozmerov pomocou sondy. Používa sa pre meranie veľkosti obrobku, ale aj pre meranie vzdialenosti jednotlivých plôch (viď obr. 13 a 14).



4.2.2 Meranie valcových plôch

Prebieha vo väčšine prípadov tak, že sonda získa súradnice niekoľkých bodov kružnice a následne je riadiaci systém schopný vypočítať priemer ale aj stred či už valca, alebo otvoru tak, ako je to naznačené na nasledujúcom obrázku.



Obr. 17) Hl'adanie stredu kružnice pomocou sondy

4.2.3 Meranie uhlov

Prebieha na podobnom princípe, ako meranie valcových plôch. Na danej ploche je zmeraných niekoľko referenčných bodov, ktoré nasledovne slúžia na určenie sklonu plochy. Môže slúžiť napríklad na finálnu diagnostiku uhlu, alebo na natočenie súradnicového systému (viď nasledujúci obrázok).



Obr. 18) Meranie úhlu pomocou sondy



Obr. 19) Vychýlenie súradnicového systému

FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

5 ANALÝZA GEOMETRICKEJ A VOLUMETRICKEJ PRESNOSTI OBRÁBACIEHO STROJA

"Geometrická presnosť obrábacieho stroja je jedným z parametrov obrábacieho stroja, ktoré zohľadňujú kvalitu výroby stroja a montáže stroja v nezaťaženom stave (neuvažujú sa žiadne sily od obrábania)"[16]. Na obrábacích strojoch vzniká množstvo chybových parametrov. Ich počet priamo závisí na type stroja a jeho kinematickej adaptibilite. Napríklad u trojosej frézky (ktorá bola použitá pri experimente) vzniká 21 rôznych chýb (9 translačných, 9 uhlových a 3 chyby vzájomnej kolmosti osí). Existujú rôzne prístroje, ktorými sa dá tento druh presnosti diagnostikovať ale aj minimalizovať. Na minimalizáciu geometrických chýb sa využíva takzvaná elektronická kompenzácia, kedy sú príčiny mechanickej nepresnosti kompenzované softvérovo. V tejto kapitole sú popísané prístroje, ktoré boli pri pokuse použité na diagnostiku nepresností a na elektronickú kompenzáciu počas experimentu.

5.1 Double ballbar

Skrátene sa taktiež nazýva DBB. Jedná sa o zariadenie slúžiace k rýchlej diagnostike obrábacieho stroja, ktoré vyvinula spoločnosť Renishaw. Meranie sa riadi podľa normy ČSN ISO 230-4. Táto norma popisuje testovanie a vyhodnocovanie radiálnej odchýlky, kruhovitosti a kruhovej hysterézie.

5.1.1 Princíp fungovania DBB

Skladá sa z dvoch magnetických guličiek opracovaných na vysokú presnosť (zvyčajne len niekoľko desiatok nanometrov) a tyče obsahujúcej tenzometre. Jedna gulička sa magneticky upne do držiaka upnutého vo vretene a druhá do držiaka pripevneného k pracovnému stolu.



Obr. 20) Diagnostika stroja pomocou double ballbaru[17]

Následne urobí jedna gulička okolo druhej kruhový pohyb v smere a proti smeru hodinových ručičiek. Rádius kruhového pohybu je pevne stanovený dĺžkou tenzometrickej tyče. Pri diagnostike stroja je pre spresnenie výsledkov vhodné voliť ballbar s čo najväčšou možnou dĺžkou. V prípade, že je na stroji obrábaná kruhová kontúra, je vhodné diagnostikovať stroj s ballbarom, ktorý má rovnakú dĺžku, ako polomer danej kontúry (nie vždy je samozrejme takýto ballbar k dispozícií). Takáto diagnostika musí prebiehať v tých istých miestach, ako obrábanie kontúry. Ballbar odosiela údaje z tenzometrov do počítača pomocou bluetooth a ten ich následne vyhodnotí pomocou softwaru Ballbar 20. Následne sú vyhodnotené chyby jednotlivých osí pomocou grafu. Zisťuje sa pomocou neho napríklad chyba kolmosti osí, chyba priečnej a axiálnej vôle, reverzačné špičky, nepresnosť servomotorov či chyby spôsobené vibráciami. Problémovými oblasťami sú vždy body, kde dochádza k zmene kvadrantu. V týchto bodoch dochádza k tvorbe takzvaných peakov, ktoré sú spôsobené tým, že jeden zo servomotorov musel pri prechode do iného kvadrantu zmeniť smer otáčania sa. Tieto peaky sa dajú čiastočne eliminovať zmenou K_v faktoru.

5.1.2 Kalibrácia ballbaru

Diagnostický prístroj ballbar patrí medzi relatívne meradlá, čo znamená, že sa musí kalibrovať. Ballbar sa musí kalibrovať v puzdre z materiálu menom zerodur. Jedná sa o špeciálny kompozit vyvinutý v NASA, ktorý má prakticky nulový koeficient tepelnej rozťažnosti.

5.2 Laser interferometer

Laser interferometer (nazývaný aj LI) je presné zariadenie na meranie vzdialenosti. Ako vyplýva už z názvu, využíva princípu laserovej interferometrie. Meranie pomocou tohto prístroja sa riadi normou ČSN ISO 230-2, ktorá pojednáva o stanovení opakovateľnosti a presnosti nabehnutia do požadovanej polohy.

5.2.1 Princíp fungovania LI

Princíp merania spočíva v tom, že je vyslaný lúč do polopriepustného zrkadla, ktoré daný lúč rozštiepi na niekoľko ďalších. Tieto lúče sú pomocou kútových odraziek presmerované do prijímača. Ten je schopný zachytiť, koľkokrát boli dané lúče spolu vo fáze, resp. koľkokrát spolu interferovali. Vysielaný lúč musí byť koherentný, tzn. musí mať jednu vlnovú dĺžku. Na základe vlnovej dĺžky a počtu interferencií je možné určiť zmenu vzdialenosti. Na obrázku 21 je zobrazená konfigurácia zrkadiel na meranie horizontálnych osí.



Obr. 21) Aplikácia interferometra v horizontálnej osi



Na ďalšom obrázku je zobrazená konfigurácia odraziek a pohyb vretena pre analýzu stroja pomocou LI v osi *z*.



Obr. 22) Aplikácia interferometra vo vertikálnej osi

Zdrojom lúča bývajú väčšinou hélium-neónové lasery. Vlnová dĺžka takýchto lúčov býva okolo 630 nanometrov. Interferometre majú rozlíšenie zhruba jeden nanometer pre lineárne meranie. Tieto prístroje sú náchylné na zmenu teploty, tlaku a relatívnej vlhkosti. Interferometer je bežne schopný merať dĺžky o veľkosti niekoľko desiatok metrov. Využívajú sa na diagnostiku, respektíve kompenzovanie chýb ako napríklad chyba polohovania, priamosť, kolmosť, rovinnosť či uhlová chyba. V tejto práci sa pracovalo s laserovým systémom XL-80 od spoločnosti Renishaw. Jedná sa o ľahko prenosný a ľahko ustaviteľný interferometer vyvinutý spoločnosťou RenishawJeho hlavnými časťami sú laserová hlavica, kompenzačná jednotka vplyvu prostredia XC 80. Na spracovanie dát sa používajú softvérový balík CARTO. *Laserová hlavica XL 80*

Je schopná vysielať lúč s vysokou mierou koherencie. Jej základné parametre môžete vidieť v tabuľke číslo 3.

Maximálna merateľná vzdialenosť	80 m
Napájacie napätie	90-264 V
Presnosť lineárneho merania	±0,5 ppm
Pracovná teplota	0 °C - 40 °C

Tab	3)	Základné	parametre	interfe	rometru	XL-	-80	19	וו
1 uo	\mathcal{I}	Luxiuuiie	purumene	muun	lonicua		001	_ + /	1

Pri používaní tohto zariadenia nie je potrebné mať na očiach žiadne ochranné prvky. Nachádzajú sa na ňom signalizačné diódy popisujúce silu signálu.



Obr. 23) Laser-interferometer XL-80 od spoločnosti Renishaw[18]

Kompenzačná jednotka vplyvu prostredia XC 80

Pri meraní pomocou interferometru môže dôjsť vplyvom zmeny vonkajších podmienok k zmene vlnovej dĺžky vysielaného lúča. Táto jednotka má za úlohu tieto vplyvy zohľadniť pri určovaní meranej vzdialenosti. Na vlnovú dĺžku má vplyv predovšetkým teplota, tlak a relatívna vlhkosť.



Obr. 24) Použitá kompenzačná jednotka XC-80 od spoločnosti Renishaw

5.2.2 Softvér CARTO

Jedná sa o softvér od firmy Renishaw. Slúži na spracovanie dát získaných z interferometra. Skladá sa z dvoch aplikácii – CAPTURE a EXPLORE. Aplikácia CAPTURE slúži primárne ako pomocný softvér pri vyrovnávaní LI, ďalej na získanie kompenzačnej matice a následné vygenerovanie kódu pre daný postprocesor. Čo sa týka aplikácie EXPLORE, tak tá má predovšetkým prezentačné využitie. Je možné v nej vykresľovať a porovnávať grafy rôznych chýb podľa rôznych svetových štandardov (viď grafy po meraní LI v kapitolách 6.4.2 a 6.4.3).



<u>Ostatné príslušenstvo</u>

Jedná sa napríklad o optické odrážače, terčíky na zrovnanie lúča, stojan laserovej hlavice atď.

5.3 LaserTRACER

Toto zariadenie sa používa na diagnostiku volumetrickej presnosti stroja. Pracovne sa nazýva LTC.

5.3.1 Princíp fungovania LTC

Pracuje na princípe sekvenčnej multilaterácie – to znamená, že je schopné jednoznačne určiť polohu bodu z aspoň štyroch nameraných vzdialeností. Ďalej využíva princíp laserovej interferometrie (tá je bližšie popísaná v predchádzajúcej podkapitole). Rôzni výrobcovia však ponúkajú rôzne varianty prevedenia tohto zariadenia. V tejto podkapitole je teda popísaný LaserTRACER-u od spoločnosti ETALON. Na vreteno CNC frézky je upevnený reflektor, pričom sa vreteno pohybuje po vopred známej dráhe. LTC sleduje pohyb tohto reflektoru, pričom pomocou sekvenčnej multilaterácie vyhodnocuje polohu reflektoru (respektíve vretena). V LaserTRACER-i sa nachádza prívod laseru, ktorý vysiela lúč. Pomocou polopriepustného zrkadla je lúč odrazený na reflektor a referenčnú guľu. Z reflektora sa lúč vracia späť do LaserTRACER-a a to konkrétne do štvorkvadrantovej diódy (ktorá je zodpovedná za samonavádzanie LaserTRACER-a) a do detektoru, ktorý meria vzdialenosť LTC od reflektoru (a tým pádom aj polohu vretena).



1) Merací lúč s nanometrovým rozlíšením

- 2) Referenčná guľa s chybou <50μm
- 3) Držiak s nízkym koeficientom tepelnej rozťažnosti materiálu

Obr. 25) LTC od spoločnosti Etalon[20]

LTC dokáže vo všeobecnosti merať menšie vzdialenosti ako Laser Tracker. Pre bližšiu predstavu o jeho parametroch sú v nasledujúcej tabuľke uvedené dôležité LaserTRACER od spoločnosti ETALON.

Priestorová neistota merania	$0,2 \ \mu m + 0,3 \ \mu m/m$			
Rozlíšenie	0,001 µm			
Merací rozsah	0,2-20 m			
Uhlový rozsah osi azimutu	od -225° do 225°			
Uhlový rozsah osi elevácie	-35° to 85°			
Hmotnosť	8,5 kg			

Tab 4) Parametre LTC od firmy etalon[20]

Na prácu so získanými dátami tohto konkrétneho typu LTC slúžia dva programy a to konkrétne Trac-Check a Track-Cal

5.3.2 Trac-Check

Tento softvér umožňuje analýzu nameraných dát podľa noriem ISO 230-2 (presnosť a opakovateľnosť polohy), ISO 230-4 (skúška kruhovej interpolácie) a ISO 230-6 (určenie presnosti polohy na diagonálach telesa a stien).

5.3.3 Trac-Cal

Vďaka tomuto programu je možné vygenerovať kompenzačné údaje a znížiť tak chyby kolmostí osí, chyby polohovania, priamostí či rotácie[21].


6 NÁVRH A VYHODNOTENIE EXPERIMENTU

Táto časť práce sa zaoberá návrhom a popisom experimentu, ktorý by mal potvrdiť alebo vyvrátiť hypotézu, že zložitosť elektronickej kompenzácie má presnosť merania pomocou obrobkovej sondy. Presnosť sondy bola teda testovaná pri vypnutých kompenzáciách. Následne pri kompenzácii polohy, kolmosti a zároveň polohy a na záver pri volumetrickej kompenzácii (konfigurácie boli vymenované vzostupne v závislosti na zložitosti). Všetky merania prebiehali v súlade s normou VDA 5. To znamená, že boli vždy merané etalóny o minimálne troch rôznych dĺžkach a každý etalón bol premeraný minimálne desať krát. Experiment bol uskutočnený v osiach x a z.

6.1 Demonštrátor

Experiment bol vykonaný na trojosej frézke typu MCV 754 QUICK (viď obrázok 26) od firmy Kovosvit.



Obr. 26) Frézka MCV 754 QUICK od spoločnosti Kovosvit[22]

Jedná sa o trojosú frézku, kde sa pracovný stôl pohybuje v osi x a y a vreteno v osi z. Dôležité parametre stroja sú uvedené v tabuľke číslo 5.

toja, na ktorom oon vykonavane pokusy[22]				
Opakovaná presnosť polohovania v osiach X,Y,Z	0,008 mm			
Pracovný rozsah v ose X	754 mm			
Pracovný rozsah v ose Y	500 mm			
Pracovný rozsah v ose Z	550 mm			
Pracovný posuv	1-15 000 mm/min			

Tab 5)	Parametre	stroja, na	ktorom	boli vy	vkonávané	pokus	v[22]	1
		5 m e j m, mm			,	p • • • • • • • • •) L	_

6.2 Ustavenie prípravku

Na meranie etalónov bol použitý prípravok zapožičaný od spoločnosti Renishaw, do ktorého sa vkladali Johansonové doštičky o rôznych dĺžkach. Bolo testovaných šesť etalónov o dĺžkach 100 mm, 150 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm a 500 mm. Tento prípravok bol použitý iba v osi *x*, v ktorej prebiehali merania vo výškach 130 mm a 295 mm.

6.2.1 Chyba merania spôsobená nedokonalým ustavením prípravku

V našich podmienkach bolo prakticky nemožné zrovnať Johansonove doštičky pod jeden mikrón. Do systému je teda vždy vnesená chyba zrovnania doštičiek, ktorá sa premietne do hodnôt nameraných sondou. V tejto podkapitole sú teda odvodené vzťahy medzi chybami zrovnaní v jednotlivých rovinách a chybou prenesenou do sondy. Následne sú tieto vzťahy aplikované na hodnoty z indikátora zistené pri pokusoch a je vypočítaná chyba sondy spôsobená nedokonalým zrovnaním našich konkrétnych etalónov.

Predpoklady korektnosti pri meraní

Pri meraní zanedbávame geometrické nepresnosti dotykovej guličky aj Johansonovej doštičky (tieto dva komponenty sú od výroby veľmi presne opracované). Ďalej predpokladáme, že dotyková gulička vykriveným etalónom z dôvodu malých deformácií vytláčaná výhradne v jednej osi (v našom prípade to bude os x). Naším posledným predpokladom je, že dotyková gulička dosadá na plochu etalónu v jej geometrickom strede.

Výpočet uhlu natočenia

Uhol natočenia sa spočíta pomocou jednoduchého trigoniometrického vzťahu (viď vzťah č. 8)

$$\alpha_n = \sin\left(\frac{\Delta_{ET_XZ}}{l}\right) \tag{8}$$

Kde Δ_{ET_XZ} reprezentuje rozdiel hodnôt z indikátora na koncoch etalónov a *l* reprezentuje dĺžku etalónu v rovine XZ. Analogicky s týmto výpočtom je vypočítaný uhol β_n reprezentujúci naklopenie v rovine XY.

$$\beta_n = \sin\left(\frac{\Delta_{ET_XY}}{l}\right) \tag{9}$$

Kde Δ_{ET_XY} samozrejme reprezentuje rozdiel nameraný indikátorom na koncoch etalónu v rovine XY.

Výpočet chyby dotyku spôsobenej naklopením dotykovej plochy

Pod touto chybou vlastne rozumieme zväčšenie nameranej hodnoty vplyvom toho, že gulička dosadá na plochu, ktorá je pod uhlom. Táto chyba je vyobrazená na obrázku číslo 27, kde je čiarkovanou čiarou znázornený pokus s nedokonale a plnou čiarou s dokonale zrovnaným etalónom.





Obr. 27) Predĺženie etalónu spôsobené naklopením

Uhly a veľkosti objektov sú v tomto obrázku samozrejme prehnané a slúžia len na ilustráciu chyby. Na obr. 28 je naznačený vzťah pre výpočet veľkosti chyby dotyku Δxz .



Obr. 28) Odvodenie predĺženia etalónu spôsobené naklopením v jednej rovine

Vieme, že plocha nakloneného etalónu musí tvoriť dotyčnicu k posunutej guličke a teda kolmica k nej v dotyčnom bode musí prechádzať stredom posunutej guličky. Z obrázku môžeme vidieť, že hodnota posunutia guličky sa vypočíta zo vzťahu číslo 10, kde R je polomer guličky a uhol α_n je uhol vychýlenia etalónu v rovine XZ.

$$\Delta_{XZ} = \frac{R}{\cos\left(\alpha_n\right)} - R \tag{10}$$

Ak si predstavíte, že natočíte etalón o 90 stupňov, tak guličku odtlačíte v osi x teoreticky do nekonečna a pri dosadení 90 stupňov za uhol α_n skutočne dostávame teoretické nekonečno.

Gulička môže byť posunutá aj kvôli zlému zrovnaniu v rovine XY. Na obrázku číslo 29 je červenou farbou vyznačené posunutie, ktorého skalárna veľkosť sa vypočíta analogicky s predchádzajúcim vzťahom. Takýto vzťah je vyjadrený v rovnici číslo 11, pričom uhol β_n tentokrát reprezentuje zlé zrovnanie etalónu v rovine XY.

$$\Delta_{XY} = \frac{R}{\cos\left(\beta_n\right)} - R \tag{11}$$

Ako bolo povedané, vypočítaná hodnota Δ_{XY} je skalárna a v predpokladoch merania sa uvažuje posuv guličky iba v osi x a z tohto dôvodu musí byť toto posunutie do danej osi premietnuté tak, ako je to znázornené na obrázku číslo 29.



Obr. 29) Odvodenie predĺženia etalónu spôsobené naklopením v dvoch rovinách

Vzťah pre výsledné posunutie guličky spôsobené zlým zrovnaním Johansonovej doštičky je teda nasledovný:

$$\Delta_{KLOP} = \frac{R}{\cos(\alpha_n)} - R + \frac{\frac{R}{\cos(\beta_n)} - R}{\cos(\alpha_n)}$$
(12)

Opäť môžete vo vzorci vidieť, že pokiaľ sa bude ktorýkoľvek uhol rovnať 90°, posunutie v osi *x* sa bude limitne blížiť nekonečnu. V prípade, že budeme roviny naklápať v opačnom poradí a teda vymeníme $cos(\alpha_n)$ za $cos(\beta_n)$ vo vzorci, dospejeme k rovnakému výsledku. Priebeh chyby spôsobenej naklopením je zobrazený na obr. 30. Graf platí pre priemer guličky 2,988 milimetra (polomer guličky použitej sondy) a dĺžku etalónu 500,00256 milimetrov.



Obr. 30) Graf predĺženia etalónu v závislosti na chybe zrovnania

Výpočet chyby dotyku spôsobenej skrátením v dôsledku naklonenia

Predchádzajúci typ chyby skresľuje nameranú hodnotu smerom nahor. Táto podkapitola sa bude zaoberať vplyvom nedokonalého zrovnania etalónu na skrátenie nameranej hodnoty (viď obrázok číslo 31).





Z tohto obrázku je vidieť, že chyba nameranej dĺžky sa spočíta pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$\Delta_{ROTXZ} = \frac{l}{2} - \frac{l * \cos(\alpha_n)}{2}$$
(13)

V prípade, že vychýlime etalón v rovine XY, dostaneme nasledujúci vzťah:

$$\Delta_{ROTXY} = \frac{l}{2} - \frac{l * \cos(\beta_n)}{2}$$
(14)

Odvodenie vzťahu pre naklonenie aj v rovine XY je znázornené na obrázku číslo 32, kde je zobrazený etalón o dĺžke l, ktorého dĺžka je však už zredukovaná natočením v rovine XZ o uhol α_n .



Obr. 32) Skrátenie etalónu vplyvom jeho nedokonalého zrovnania v dvoch rovinách

Pri jednostrannom meraní etalónu je teda dĺžka etalónu skreslená o hodnotu z rovnice číslo 15.

$$\Delta_{ROT} = \frac{l}{2} - \frac{l * \cos(\alpha_n) * \cos(\beta_n)}{2}$$
(15)

Závislosť skrátenia etalónu vplyvom natočenia na hodnote nameranej z indikátoru je zobrazená na nasledujúcom obrázku. Graf platí pre dĺžku etalónu 500,00256 milimetra.



Obr. 33) Závislosť skrátenia etalónu od chyby zrovnania

FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

Teoreticky by malo platiť, že pri vychýlení v rovine XY alebo XZ o 90 stupňov bude chyba merania rovná polovici dĺžky etalónu a tým pádom by sme teoreticky pri meraní dĺžky etalónu mali namerať nulu.

Výsledná chyba merania spôsobená nedokonalým zrovnaním

Z predchádzajúcich dvoch podkapitol vyplýva, že výsledná chyba merania spôsobená zlým zrovnaním kusu sa spočíta pomocou nasledujúceho vzťahu.

$$\Delta_{CELK} = \Delta_{KLOP} - \Delta_{ROT} \tag{16}$$

Po dosadení odčítaných hodnôt z indikátorov je možné vypočítať chyby, ktoré vstúpili do systému pri jednotlivých pokusoch. Za dĺžku etalónu *l* budeme dosadzovať 500 milimetrov a polomer dotykovej guličky, s ktorou bol robený pokus bol 2,8 milimetra. Na základe údajov z indikátora zo zrovnávania prípravku v kapitolách 6.2.2 a 6.2.3 sú vypočítané uhly pre ustavenie vo výške 130 milimetrov ($\alpha_{130} a \beta_{130}$) a 295 ($\alpha_{295} a \beta_{295}$) pomocou vzťahu 8 resp. vzťahu 9.

Tab 6) Uhlové chyby spôsobené zlým zrovnaním vo výškach 130 a 295 milimetrov

Uhol	Veľkosť uhlu[º]
α_{130}	9.167*10 ⁻⁴
β_{130}	$2.292*10^{-4}$
α_{295}	$1.031*10^{-3}$
β_{295}	5.73*10 ⁻⁴

Po dosadení uhlov do rovnice 16 zistíme, že celková chyba spôsobená zlým zrovnaním etalónu vo výške 130 milimetrov je 3,361*10⁻⁸ metra a vo výške 295 milimetrov je chyba 5,238*10⁻⁸ metra. Obe tieto chyby sú rádovo nižšie, ako je rozlíšenie stroja a preto ich môžeme zanedbať. Na nasledujúcom obrázku môžeme vidieť veľkosť chyby pre nami nameranú hodnotu z indikátora závislú na dĺžke etalónu.



Obr. 34) Závislosť celkovej chyby na dĺžke etalónu

6.2.2 Ustavenie vo výške 130 milimetrov

Výška 130 milimetrov nebola vybraná náhodne. Práve v tejto výške bol umiestnený doubleballbar počas kompenzácie kolmostí. Na nasledujúcom obrázku môžete vidieť spomínaný prípravok vypodložený brúsenými kockami tak, aby dosahoval danú výšku.



Obr. 35) Ustavovanie etalónov vo výške 130 milimetrov

Pri ustavovaní prípravku bolo taktiež dôležité umiestnenie prípravku o ose x. Pre spresnenie merania bol prípravok umiestnený tak, aby začiatky a konce etalónov ležali v blízkom okolí kompenzačných bodoch laser interferometra a LaserTRACER-a. Tento presne opracovaný prípravok bol dodatočne zarovnaný indikátorom v ose x. Horná plocha etalónov bola vyrovnaná na 2 µm a bočné plochy na hodnotu 8 µm. Príklad zrovnávania bočnej strany etalónov môžete vidieť na nasledujúcej dvojici obrázkov.



Obr. 36) Zrovnávanie ľavého bočného konca etalónu



Obr. 37) Zrovnávanie pravého bočného konca etalónu



6.2.3 Ustavenie vo výške 295 mm

Toto ustavenie malo za úlohu následne demonštrovať vplyv chýb kolmostí medzi osami.

Pre dosiahnutie výšky 295 mm bol prípravok vypodložený oceľovými presne brúsenými kockami zobrazenými na ďalšom obrázku.



Obr. 38) Vypodloženie prípravku do výšky 295 milimetrov

Takto vypodložený prípravok bol tiež vyrovnaný indikátorom v osi x. Vrchná plocha na 9 μ m a bočné plochy na 5 μ m.

6.2.4 Ustavenie v osi z

Pre os z nebol použitý žiadny prípravok. Toto meranie prebiehalo na troch rôznych etalónoch o dĺžkach 100 mm, 150 mm a 300 mm. Etalóny priliehali priamo na pracovný stôl. Boli zaaretované pomocou dvoch magnetov (viď nasledujúci obrázok).



Obr. 39) Meranie etalónov v osi z

6.3 Kalibrácia sondy

Bola vykonaná kalibrácia dotyku sondy pomocou krúžkového etalónu. Príklady takejto kalibrácie sú vyobrazené na nasledujúcej dvojici ilustračných obrázkov.



Obr. 40) Hľadanie stredu kalibračného krúžku



Obr. 41) Nájdenie stredu kalibračného krúžku

Po kalibrácii dotyku bola takisto vykonaná výšková kalibrácia sondy pomocou Johansonovej mierky.

6.4 Nastavenie merania obrobkovou sondou a postup získania dát

Ako bolo povedané ma začiatku tejto kapitoly, celý pokus má demonštrovať vplyv komplexnosti elektronickej kompenzácie na presnosť obrobkovej sondy. V ďalšej sérii štyroch obrázkov bude zobrazený prostredníctvom vývojových diagramov postup pri získavaní surových dát.



stroja a kompenzácia pomocou LI

Obr. 43) Zisk surových dát kompenzácia pomocou DBB a LI



Norma VDA 5 vyžaduje, aby boli premerané minimálne 3 etalóny a aby bolo na každom etalóne vykonaných minimálne 10 meraní Merania v osi *x* prebiehali tak, že sa vždy na jednom etalóne spustil cyklus merania 10 krát z jednej strany a následne 10 krát z druhej strany.



Následne sa prešlo na ďalší etalón. Priebeh získavania dát v osi x môžete vidieť na obrázku číslo 46.



Obr. 46) Spôsob premeriavania etalónov v osi x

V osi z boli merané 3 etalóny a to len z jednej strany (viď obrázok číslo 47). Nameraná hodnota bola odčítaná od dĺžky osi.



6.5 Merania dĺžok etalónov

V tejto podkapitole sú jednotlivo popísané použité konfigurácie kompenzácie. Pri každom type kompenzácie je uvedená tabuľka nameraných hodnôt. V jej spodných dvoch riadkoch sú vyhodnotené aritmetické priemery a smerodajné odchýlky meraní pre jednotlivé etalóny v danom pokuse. Tieto dve štatistické veličiny budú potrebné pre vyhodnocovanie pokusu podľa normy VDA 5 v kapitole 6.6.

6.5.1 Stroj s vypnutými kompenzáciami

Merania prebiehali bez použitia akejkoľvek kompenzácie. Pri tejto metóde je predpoklad, že sa výsledky budú najviac líšiť od skutočnej hodnoty etalónov.

Meranie v ose x vo výške 130 milimetrov

Pre toto ustavenie boli premerané štyri etalóny. Výsledky meraní sú vypísané v nasledujúcej tabuľke.

Dĺžka etalónu Číslo pokusu	100,00015 [mm]	150,00069 [mm]	300,00224 [mm]	500,00256 [mm]
1	99,9984	149,9984	299,9974	499,9847
2	99,9985	149,9984	299,9954	499,9826
3	99,9984	149,9983	299,9943	499,9816
4	99,9984	149,9972	299,9942	499,9808
5	99,9983	149,9982	299,9942	499,9796
6	99,9974	149,9974	299,9944	499,9778
7	99,9963	149,9971	299,9931	499,4758
8	99,9976	149,9971	299,9931	499,9738
9	99,9965	149,9974	299,9924	499,9707
10	99,9966	149,9973	299,9923	499,9707
Aritmetický priemer [mm]	99,99764	149,99768	299,99408	499,92781
Smerodajná odchýlka [mm]	0,000890942	0,000567255	0,001522279	0,158894846

Tab 7) Výsledky meraní v osi x vo výške 130 mm – vypnuté kompenzácie



Meranie v ose x vo výške 295 milimetrov

V tomto ustavení boli premeriavané tie isté etalóny, ako v predchádzajúcom ustavení. Namerané hodnoty sú vypísané v tabuľke číslo 8.

Dĺžka etalónu Číslo pokusu	100,00015 [mm]	150,00069 [mm]	300,00224 [mm]	500,00256 [mm]
1	99,9790	149,9794	299,9774	499,9641
2	99,9781	149,9791	299,9762	499,9642
3	99,9780	149,9792	299,9755	499,9641
4	99,9782	149,9791	299,9755	499,9644
5	99,9781	149,9783	299,9754	499,9644
6	99,9783	149,9781	299,9755	499,9641
7	99,9782	149,9781	299,9753	499,9643
8	99,9782	149,9783	299,9754	499,9641
9	99,9780	149,9782	299,9754	499,9644
10	99,9783	149,9783	299,9754	499,9644
Aritmetický priemer [mm]	99,97824	149,97861	299,9757	499,96425
Smerodajná odchýlka [mm]	0,000287518	0,000519508	0,000648074	0,000143372

Tab 8) Výsledky meraní v osi x vo výške 295 mm – vypnuté kompenzácie

<u>Meranie v ose z</u>

V osi z boli premerané iba tri etalóny (viď tabuľka č.9). To znamená minimum, ktoré je požadované podľa normy VDA 5.

Dĺžka etalónu			
	100,00015	150,00069	200,00195
Číslo pokusu	[mm]	[mm]	[mm]
1	100,0503	150,0471	200,0386
2	100,0500	150,0461	200,0387
3	100,0502	150,0463	200,0385
4	100,0503	150,0464	200,0386
5	100,0502	150,0462	200,0387
6	100,0503	150,0462	200,0387
7	100,0503	150,0464	200,0386
8	100,0502	150,0464	200,0387
9	100,0500	150,0463	200,0388
10	100,0500	150,0464	200,0387
Aritmetický priemer	100,05018	150,04638	200,03866
[mm]			
Smerodajná odchýlka [mm]	0,000131656	0,000274064	0,000084327

Tab 9) Výsledky meraní v osi z – vypnuté kompenzácie

6.5.2 Kompenzácia polohy

V tomto kroku bola vykonaná kompenzácia polohy pomocou laserového interferometra typu XL-80 od spoločnosti Renishaw. Daný proces bol vykonaný vo všetkých troch osiach. Na nasledujúcej trojici obrázkov môžete vidieť konfigurácie odraziek v osi x, y a z.





Celkovo pomocou interferometru prebehlo šesť diagnostík – pre každú os jedna kalibračná a jedna verifikačná. Výsledky boli vyhodnotené pomocou programu CARTO taktiež od spoločnosti Renishaw. Nižšie je pre každú os zobrazený jeden obrázok v ktorom je zobrazený stav osi pred kompenzáciou (modrá farba) a po kompenzácii (fialová farba). Pre každú os je taktiež zostavená tabuľka zobrazujúca kľúčové parametre taktiež pred a po kompenzácii.

<u>Os x</u>

Pre os x bol skompenzovaný interval od X=10mm do X=740mm. Bolo vytvorených 6 kompenzačných bodov s krokom 121,66 mm. Zlepšenie polohovania vplyvom použitia LI môžete vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obr. 51) Chyba polohovania osi x pred kompenzáciou (modrá) a po kompenzácii (fialová)



Všetky parametre okrem opakovateľnosti boli zaručene zlepšené. Podľa tabuľky došlo k zhoršeniu opakovateľnosti polohy, avšak vzhľadom k veľkosti rozdielu a veľkosti rozlíšenia meracieho systému môžeme prehlásiť, že sa opakovateľnosť polohy nezmenila (viď tab. č. 10)

, <u> </u>	1 1 1		
Parameter	Pred kompenzáciou	Po kompenzácii	Rozdiel
Chyba polohy [µm]	18,5	1,8	-16,7
Opakovateľnosť polohy [µm]	0,9	1	0,1
Chyba systematickej polohy [μm]	18,3	1,5	-16,8
Rozsah strednej obojsmernej odchýlky umiestnenia [µm]	18,2	1,4	-16,8

Tab 10)Parametre pred a po kompenzácii pomocou LI v osi x

<u>Os y</u>

V ose y došlo ku kompenzácii intervalu od Y=25 mm do Y=475 mm. Daný interval bol rovnomerne rozdelený do 19 kompenzačných bodov s rozmedzím 25 mm. Po aplikácii softvéru CARTO nasledujúce výsledky.



Obr. 52) Chyba polohovania osi y pred kompenzáciou (modrá) a po kompenzácii (fialová)

V tabuľke 11 je znázornená zmena parametrov po kompenzácii polohy osi *y*. Tentokrát došlo k zlepšeniu všetkých dôležitých parametrov.

Parameter	Pred kompenzáciou	Po kompenzácii	Rozdiel
Chyba polohy [µm]	10,8	1,5	-9,3
Opakovateľnosť polohy [μm]	1,4	1,1	-0,3
Chyba systematickej polohy [µm]	9,9	0,8	-9,1
Rozsah strednej obojsmernej odchýlky umiestnenia [µm]	9,8	0,7	-9,1

Tab 11)Parametre pred a po kompenzácii pomocou LI v osi y

<u>Os z</u>

Ako posledná bola skompenzovaná osa z. V nej bolo rovnomerne rozdelených 17 kompenzačných bodov v intervale od Z=-425 mm do Z=-25 mm. Rozmedzie medzi susediacimi bodmi bolo znovu 25mm.



Obr. 53) Chyba polohovania osi z pred kompenzáciou (modrá) a po kompenzácii (fialová)

Pre os *z* platí to isté, čo pre ostatné osi. Tzn. opakovateľnosť ostala nezmenená, inak sme pomocou kompenzácie dospeli zlepšeniu všetkých ostatných parametrov (viď tabuľka číslo 12).



Tab 12)Parametre pred a po kompenzácii pomocou LI v osi z

Parameter	Pred kompenzáciou	Po kompenzácii	Rozdiel
Chyba polohy [µm]	10	1,4	-8,6
Opakovateľnosť polohy [µm]	0,5	0,5	0
Chyba systematickej polohy [µm]	9,7	1,3	-8,4
Rozsah strednej obojsmernej odchýlky umiestnenia [µm]	9,6	1,1	-8,5

Meranie v osi x vo výške 130 milimetrov

Po úspešnej kompenzácii polohy boli pre danú konfiguráciu stroja a dané ustavenie etalónov boli namerané nasledujúce hodnoty.

Výsledky meraní v osi x vo výške 130mm pri kompenzácii pomocou LI

		/ 1	1	1
Dĺžka etalónu	100 00015	150 00060	200 00224	500 00256
	100,00015	150,00069	300,00224	500,00256
Císlo pokusu	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	99,983	149,9836	299,9884	499,9854
2	99,9792	149,9834	299,9881	499,9755
3	99,9794	149,9836	299,9882	499,9853
4	99,9791	149,9827	299,9881	499,9854
5	99,9791	149,98337	299,9883	499,9855
6	99,9792	149,9834	299,9881	499,9853
7	99,9792	149,9835	299,9882	499,9354
8	99,9791	149,9835	299,9881	499,9852
9	99,9794	149,9836	299,9881	499,9855
10	99,9792	149,982	299,9884	499,9852
Aritmetický priemer	99 97959	149 983267	299 9882	499 97937
[mm]	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	147,703207	277,7002	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
Smerodajná odchýlka [mm]	0,00120319	0,000517903	0,000124722	0,015756907

Meranie v ose x vo výške 295 milimetrov

Po získaní hodnôt vo výške 130 milimetrov boli premerané tie isté etalóny vo výške 295 milimetrov. Získané hodnoty sú v nasledujúcej tabuľke.

Dĺžka etalónu Číslo pokusu	100,00015 [mm]	150,00069 [mm]	300,00224 [mm]	500,00256 [mm]
1	99,9805	149,9882	299,9842	499,9775
2	99,9803	149,9824	299,9834	499,9773
3	99,9805	149,9813	299,9835	499,9774
4	99,9803	149,9811	299,9832	499,9773
5	99,9803	149,9811	299,9833	499,9776
6	99,9802	149,9811	299,9833	499,9776
7	99,9804	149,9811	299,9832	499,9774
8	99,9803	149,9812	299,9834	499,9775
9	99,9803	149,9813	299,9833	499,9774
10	99,9804	149,9813	299,9835	499,9775
Aritmetický priemer [mm]	99,98035	149,98201	299,98343	499,97745
Smerodajná odchýlka [mm]	9,71825E-05	0,002209801	0,000290784	0,000108012

Tab 14)Výsledky meraní v osi x vo výške 295 mm pri kompenzácii pomocou LI

<u>Meranie v ose z</u>

Ako posledné boli premerané etalóny v osi z. Ich hodnoty sú zapísané v tabuľke č.15.

Dĺžka etalónu 100,00015 150,00069 200,00195 Číslo pokusu [mm] [mm] [mm] 150,0407 100,0400 200,0358 1 2 100,0401 150,0405 200,0358 3 100,0401 150,0407 200,0356 4 100,0402 200,0359 150,0406 5 100,0403 150,0405 200,0358 6 100,0403 150,0405 200,0358 7 100,0401 150,0408 200,0356 8 100,0400 150,0405 200,0359 9 100,0403 150,0405 200,0358 10 100,0403 150,0407 200,0356 Aritmetický priemer 100,04017 150,0406 200,03576 [mm] Smerodajná odchýlka 0,000125167 0,00011547 0,000117379 [mm]

Tab 15)Výsledky meraní v osi z pri kompenzácii pomocou LI



6.5.3 Kompenzácia kolmostí a následne polohy

Prvou časťou tejto metódy bola kompenzácia kolmosti vo všetkých troch rovinách pomocou DBB. Posuvová rýchlosť double-ballbaru bola nastavená na 500 milimetrov za minútu a nemala by sa významne podieľať na výslednej chybe diagnostiky. Dĺžka použitého double-ballbaru bola 150 milimetrov. Podobne, ako v prvej metóde kompenzácie prebehlo šesť diagnostík (tiež jedna kalibračná a jedna verifikačná pre každú osu). Ako prvá bola skompenzovaná rovina XY viď nasledujúca fotka. Stroj bol skompenzovaný v rovnakých bodoch, ako v predchádzajúcej konfigurácii.



Obr. 54) Diagnostika DBB v rovine XY

V tejto rovine je možné vykonávať interpoláciu v plnom rozsahu, tzn. 360 stupňov. Na nasledujúcej dvojici obrázkov môžete vidieť stav stroja pred a po kompenzácii, kde došlo k zníženiu chyby kolmosti z 16,6 µm na 4 µm.



pomocou DBB v rovine XY

Ako druhá bola skompenzovaná rovina XZ. Interpolácia prebiehala v rozpätí 220 stupňov. Na obrázku nižšie môžete vidieť názorný príklad aplikácie ballbaru v tejto rovine.

pomocou DBB v rovine XY



Obr. 57) Diagnostika DBB v rovine XZ

Chyba kolmosti v tejto rovine bola znížená z hodnoty -6,7 μm na hodnotu 0,8 μm. Na nasledujúcej dvojici obrázkov je zobrazená diagnostika z programu Ballbar 20 pre rovinu XZ.



Obr. 58) Kalibračná diagnostika pomocou DBB v rovine XZ

Obr. 59) Verifikačná diagnostika pomocou DBB v rovine XZ

Ako posledná bola skompenzovaná rovina YZ. Vreteno interpolovalo taktiež v intervale o veľkosti 220 stupňov viď nasledujúci obrázok.



Obr. 60) Diagnostika DBB v rovine YZ



V tejto rovine zároveň došlo k najvýraznejšiemu odbúraniu chyby kolmosti, keďže sa ju podarilo eliminovať z hodnoty 34 µm na 1,1 µm. Výstupné grafy z programu Ballbar 20 môžete vidieť na nasledujúcej dvojici obrázkov.



Obr. 61) Kalibračná diagnostika pomocou DBB v rovine YZ

Obr. 62) Verifikačná diagnostika pomocou DBB v rovine YZ

Pre názornosť sú v tabuľke nižšie vypísané chyby kolmostí z verfikačného a kalibračného merania.

Tab 16)	Vplyv kompenzácie DBB na kolmosť os	í
---------	-------------------------------------	---

Rovina	Kolmosť pred kompenzáciou [µm]	Kolmosť po kompenzácii [µm]	Rozdiel [µm]
XY	16,6	4	12,6
YZ	34	1,1	32,9
ZX	-6,7	0,8	0,9

Pomocou ballbaru boli diagnostikované aj hodnoty tolerancie chýb polohy jednotlivých osí (viď tabuľka 17)

Tab 17)	Vplyv	kompenzáci	ie DBB n	a chybu	polohovania
,				-	

Rovina	Poloha pred kompenzáciou	Poloha po kompenzácii	Rozdiel
110 / 110	[µm]	[μm]	[µm]
XY	34,4	27,5	6,9
YZ	27,6	18,9	8,7
ZX	37,3	36,8	0,5

Druhá časť tohto pokusu prebiehala analogicky s predchádzajúcim pokusom. Keďže sú v tejto metóde skompenzované aj chyby kolmostí, očakáva sa, že sonda nameria etalón s väčšou presnosťou. Modrá čiara opäť popisuje chybu polohy osi pred kompenzáciou a fialová po kompenzácii. Zároveň je nutné podotknúť, že vo všetkých osiach došlo znovu k zlepšeniu všetkých parametrov okrem opakovateľnosti polohy – tá sa nezmenila.



Obr. 63) Chyba polohovania osi x pred kompenzáciou (modrá) a po kompenzácii (fialová)

Z grafu je vidieť, že došlo k výraznému zlepšeniu polohovania stroja. Parametre zlepšené kompenzáciou pomocou LI sú zapísané v nasledujúcej tabuľke.

Parameter	Pred kompenzáciou	Po kompenzácii	Rozdiel
Chyba polohy [µm]	16,1	1,4	-14,7
Opakovateľnosť polohy [µm]	1,2	1	-0,2
Chyba systematickej polohy [µm]	15,4	0,9	-14,5
Rozsah strednej obojsmernej odchýlky umiestnenia [µm]	15,3	0,7	-14,6

Tab 18)Parametre zlepšené pomocou LI v osi x po kompenzácii kolmostí





Obr. 64) Chyba polohovania osi y pred kompenzáciou (modrá) a po kompenzácii (fialová)

Zlepšenie dôležitých parametrov polohovania získaných zo softvéru CARTO je uvedené v nasledujúcej tabuľke.

,	<u> </u>		
Parameter	Pred kompenzáciou	Po kompenzácii	Rozdiel
Chyba polohy [µm]	11,6	0,9	-10,7
Opakovateľnosť polohy [µm]	1,2	0,8	-0,4
Chyba systematickej polohy [µm]	11,2	0,5	-10,7
Rozsah strednej obojsmernej odchýlky umiestnenia [µm]	10,9	0,4	-10,5

Tab 19)Parametre zlepšené pomocou LI v osi y po kompenzácii kolmostí



Obr. 65) Chyba polohovania osi z pred kompenzáciou (modrá) a po kompenzácii (fialová)

Parametre ovplyvnené kompenzáciou sú zapísané v tabuľke 20.

,	1 1	° 1 1	
Parameter	Pred kompenzáciou	Po kompenzácii	Rozdiel
Chyba polohy[µm]	9,8	1,3	-8,5
Opakovateľnosť polohy[µm]	0,8	0,6	-0,2
Chyba systematickej polohy[µm]	9,3	1,1	-8,2
Rozsah strednej obojsmernej odchýlky umiestnenia [µm]	9,1	0,9	-8,2

Tab 20)Parametre zlepšené pomocou LI v osi z po kompenzácii kolmostí

Pre takto vytvorenú konfiguráciu stroja boli namerané hodnoty uvedené v nasledujúcich bodoch.



<u>Meranie v osi x pre z=130mm</u>

Po zlepšení polohovania a kolmostí pomocou LI a DBB bolo ako prvé premerané ustavenie etalónov vo výške 130 milimetrov (viď nasledujúca tabuľka).

Tab 21)

21) Výsledky meraní v ose x vo výške 130 mm pri kompenzácii LI a DBB

Dĺžka etalónu Číslo pokusu	100,00015 [mm]	150,00069 [mm]	300,00224 [mm]	500,00256 [mm]
1	99,9798	149,9823	299,9899	499,9855
2	99,9797	149,9824	299,9877	499,9846
3	99,9786	149,9813	299,9878	499,9846
4	99,9787	149,9825	299,9876	499,9846
5	99,9787	149,9815	299,9877	499,9844
6	99,9786	149,9814	299,9877	499,9844
7	99,9788	149,9813	299,9876	499,9845
8	99,9786	149,9814	299,9876	499,9846
9	99,9787	149,9812	299,9877	499,9856
10	99,9788	149,9815	299,9876	499,9855
Aritmetický priemer [mm]	99,9789	149,98168	299,98789	499,98483
Smerodajná odchýlka [mm]	0,000454606	0,00050728	0,000709382	0,000492274

Meranie v ose x pre z=295 mm

Pre etalóny vo výške 295 milimetrov boli namerané nasledujúce hodnoty.

) vysledky merani v ose x vo vysk			yske 295 mm	pri kompenza	CII LI a DBB
	Dĺžka etalónu Číslo pokusu	100,00015 [mm]	150,00069 [mm]	300,00224 [mm]	500,00256 [mm]
	1	99,9794	149,9804	299,9836	499,9766
	2	99,9792	149,9804	299,9815	499,9755
	3	99,9794	149,9807	299,9826	499,9754
	4	99,9794	149,9805	299,9835	499,9747
	5	99,9794	149,9807	299,9824	499,9744
	6	99,9795	149,9804	299,9815	499,9754
	7	99,9795	149,9806	299,9817	499,9744
	8	99,9795	149,9806	299,9817	499,9744
	9	99,9794	149,9804	299,9825	499,9756
	10	99,9791	149,9806	299,9814	499,9756
	Aritmetický priemer [mm]	99,97938	149,98053	299,98224	499,9752
	Smerodajná odchýlka [mm]	0,000131656	0,000125167	0,000819485	0,000716473

Tab 22)Výsledky meraní v ose x vo výške 295 mm pri kompenzácii LI a DBB

<u>Meranie v osi z</u>

V osi z boli opäť premerané tri etalóny. Výsledky meraní sú zapísané v nasledujúcej tabuľke.

Dĺžka etalónu			
	100,00015	150,00069	200,00195
Číslo pokusu	[mm]	[mm]	[mm]
1	100,0354	150,0348	200,0283
2	100,0353	150,0349	200,0285
3	100,0353	150,0347	200,0284
4	100,0351	150,0347	200,0283
5	100,0354	150,0346	200,0283
6	100,0354	150,0346	200,0286
7	100,0354	150,0348	200,0285
8	100,0354	150,0347	200,0284
9	100,0354	150,0349	200,0286
10	100,0351	150,0346	200,0281
Aritmetický priemer [mm]	100,03532	150,03473	200,0284
Smerodajná odchýlka [mm]	0,000122927	0,00011595	0,000156347

Tab 23)Výsledky meraní v ose z pri kompenzácii pomocou LI a DBB

6.5.4 Kompenzácia pomocou LTC

Stroj bol skompenzovaný pomocou LTC od firmy ETALON. Skompenzované boli všetky tri osi. Veľkosti kompenzačných intervalov a počty kompenzačných bodov kompenzácii pre jednotlivé osi sú popísané v nasledujúcej tabuľke.

Tab 24)Kompenzačné údaje z LTC

	Počiatok intervalu	Koniec intervalu	Počet kompenzač. bodov
Os <i>x</i> [mm]	100	600	11
Os y [mm]	0	500	11
Os <i>z</i> [mm]	0	-450	10

Opäť bola vytvorená kalibračná aj verifikačná diagnostika a opäť došlo k výraznému zlepšeniu presnosti stroja. Zlepšenie volumetrickej presnosti stroja po kompenzácii LTC je znázornené na nasledujúcej dvojici obrázkov.





Meranie v osi x pre z=130 mm

V tomto ustavení bolo teraz pre zmenu premeraných až šesť etalónov (viď nasledujúca tabuľka).

Tab 25)	Výsledk	y meraní v o	osi <i>x</i> vo vý	ýške 130	mm pri ko	mpenzácii LT
1 uo 20)	, joican	j morani v o	,51,77,70,79	SRC 150	min pri ko	

Dĺžka etalónu						
	100,00015	150,00069	200,00195	300,00224	399,99908	500,00256
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Císlo pokusu 📃						
1	99,98494	149,98967	199,99439	299,99865	400,00787	500,01060
2	99,98409	149,98938	199,99472	299,99831	400,00807	500,01014
3	99,98381	149,98951	199,99490	299,99861	400,00819	500,01025
4	99,98374	149,98910	199,99488	299,99845	400,00813	500,01006
5	99,98387	149,98959	199,99487	299,9986	400,00901	500,00995
6	99,98373	149,98933	199,99494	299,99886	400,0088	500,0105
7	99,98360	149,98948	199,9949	299,99871	400,00932	500,01045
8	99,98402	149,98942	199,99520	299,9991	400,00914	500,01031
9	99,98368	149,98973	199,99499	299,99912	400,00914	500,01060
10	99,98402	149,98962	199,99469	299,99913	400,00894	500,01039
Aritmetický						
priemer	99,98395	149,98948	199,99484	299,99875	400,00866	500,01033
[mm]						
Smerodajná						
odchýlka	0,000384	0,0001861	0,0002136	0,0002893	0,0005365	0,000224
[mm]						

Meranie v osi x pre z=295 mm

V tomto ustavení bolo opäť premeraných šesť etalónov. Výsledky meraní sú zapísané v tabuľke číslo 26.

Dĺžka etalónu Číslo pokusu	100,00015 [mm]	150,00069 [mm]	200,00195 [mm]	300,00224 [mm]	399,99908 [mm]	500,00256 [mm]
1	99,98470	149,98311	199,98594	299,9879	399,98731	499,98828
2	99,98461	149,98277	199,98606	299,98801	399,98711	499,98828
3	99,98429	149,98289	199,98606	299,98784	399,98714	499,98772
4	99,98386	149,98317	199,98621	299,98742	399,98714	499,98802
5	99,98358	149,98289	199,98620	299,98791	399,98688	499,98809
6	99,98334	149,9829	199,98604	299,98800	399,98713	499,98800
7	99,98297	149,98263	199,98617	299,98798	399,98743	499,98814
8	99,98310	149,98266	199,98599	299,98764	399,98703	499,98818
9	99,98287	149,98258	199,98597	299,98785	399,98715	499,98785
10	99,98286	149,98269	199,98578	299,98769	399,98723	499,98788
Aritmetický priemer [mm]	99,98362	149,98283	199,98604	299,98782	399,98716	499,98804
Smerodajná odchýlka [mm]	0,000712	0,0002002	0,0001322	0,0001883	0,0001489	0,0001866

Tab 26)Výsledky meraní v osi x vo výške 295 mm pri kompenzácii LTC

<u>Meranie v osi z</u>

V tejto osi boli opäť premerané tri etalóny. Namerané hodnoty sú v tabuľke číslo 27.

Dĺžka etalónu Číslo pokusu	100,00015 [mm]	150,00069 [mm]	200,00195 [mm]
1	100,01801	150,01838	200,02015
2	100,01803	150,01835	200,02015
3	100,01809	150,01832	200,02008
4	100,01813	150,01834	200,02006
5	100,01809	150,01831	200,02007
6	100,01819	150,01830	200,02011
7	100,01814	150,01829	200,02009
8	100,01816	150,01828	200,02015
9	100,01821	150,01817	200,02010
10	100,01823	150,01827	200,02011
Aritmetický priemer [mm]	100,018128	150,018301	200,020107
Smerodajná odchýlka [mm]	0,00007345	0,00005705	0,00003368

Tab 27)Výsledky meraní v osi z pri kompenzácii LTC



6.6 Vyhodnotenie spôsobilosti merania

6.6.1 Teória štatistického spracovania podľa noriem

Na neistotu merania má vplyv široká škála aspektov vstupujúcich do systému merania (viď obr. 68).



Obr. 68) Prvky ovplyvňujúce systém merania

Jednou z úloh tejto práce bolo vyhodnotiť podľa normy VDA 5 najmenšiu toleranciu, v ktorej je stroj schopný posudzovať rozmery pomocou sondy. Pre túto toleranciu podľa danej normy platí nasledujúci vzťah[23]:

$$TOL = \frac{4 * C_g * S_g}{0.2} \tag{17}$$

Kde C_g je index potenciálu meracieho systému. Podľa tejto normy platí, že dosahuje hodnotu 1,33. Hodnota S_g reprezentuje smerodajnú odchýlku vytvorenú z meraní jednotlivých etalónov. Takto vypočítaná hodnota tolerancie predstavuje rozdiel horného medzného rozmeru a dolného medzného rozmeru tak, ako je to naznačené v nasledujúcom obrázku.



Obr. 69) Interval tolerancie spôsobilosti systému

Po vypočítaní danej tolerancie musí však platiť podmienka, že index spôsobilosti meracieho systému C_{gk} (viď vzťah číslo 18[23]) musí byť väčší alebo rovný ako 1,33. V prípade, že táto podmienka je splnená, hodnota tolerancie, ktorá bola pre dané meranie vypočítaná vo vzťahu 17 je konečná. Pokiaľ však daná podmienka splnená nie je, je korektné postupne zvyšovať hodnotu tolerancie až dovtedy, kým nevyjde parameter C_{gk} podľa vzťahu 18 väčší alebo rovný hodnote 1,33.

$$C_{gk} = \frac{0.1 * TOL - B_i}{2 * S_g}$$
(18)

Hodnota *TOL* vo vzťahu 18 predstavuje toleranciu získanú zo vzťahu 17. Hodnota B_i predstavuje systematickú odchýlku[23]:

$$B_i = \left| \overline{x_g} - x_m \right| \tag{19}$$

Kde $\overline{x_g}$ reprezentuje aritmetický priemer z odčítaných hodnôt a x_m predstavuje hodnotu referenčného etalónu. Hodnoty x_m boli získané premeraním etalónov v Českom metrologickom inštitúte. Pri získavaní dát je dôležité, aby prebehlo minimálne 30 meraní na minimálne troch etalónoch – každý etalón musí byť premeraný aspoň desať krát. Pre každý pokus bola vypočítaná hodnota tolerancie spôsobilosti. Na obrázku 70 je znázornený vývojový diagram výpočtu tolerancie a vyhodnocovaniu jedného ustavenia etalónov.



Obr. 70) Postup pri vyhodnocovaní dát podľa VDA 5



Vyhodnotenie pokusu v Matlabe

Samotné vyhodnocovanie podľa danej normy prebiehalo v softvéri Matlab. Avšak, na zápis dát bol použitý program Excel. Bol vytvorený jednoduchý vzorový excelovský súbor (viď príloha s názvom "Vzorová tabuľka pre zapisovanie hodnôt"). Doňho boli zapísané údaje v milimetroch pre každý etalón tak ako je to naznačené v nasledujúcom obrázku.



Obr. 71) Postup pri zápise hodnôt do Excelu

Jeden takýto excelovský súbor slúžil na popísanie jednej konfigurácie stroja pre jedno ustavenie etalónov. Celkovo máme tri spôsoby ustavenia Johansonových mierok a na každé ustavenie boli použité vždy štyri rôzne typy kompenzácií. To znamená, že na zápis našich dát bolo použitých dvanásť excelovských súborov. Vyhodnocovanie prebiehalo tak, že si skript po spustení vyžiadal cestu k zložke s excelovským súbormi. Užívateľ zadá cestu k excelovským súborom z práve jedného ustavenia. Zo všetkých excelovských súborov v danej zložke (vždy boli štyri) skript extrahoval dáta, ktoré následne vyhodnotil podľa postupu popísaného v predchádzajúcej podkapitole na obrázku 70. Následne boli dáta vykreslené do grafu, ktorý predstavoval závislosť tolerancie spôsobilosti merania na dĺžke etalónu. Príklad takéhoto grafu môžete vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obr. 72) Príklad výstupu zo skriptu

Ako môžete vidieť, graf obsahuje taktiež legendy. Tie sú extrahované z názvov excelovských súborov a preto je vhodné pri pomenovávaní týchto súborov zvoliť názov, ktorý stručne popisuje pokus (napríklad typ použitej kompenzácie, pracovnú os, výšku etalónov atď.). V takto vytvorenom grafe môžete prehľadne vidieť vplyv elektronickej kompenzácie na presnosť merania pomocou sondy a môžeme vyvodzovať čiastkové závery pre rôzne ustavenia Johansonových mierok. Takýmto spôsobom boli spracované všetky tri ustavenia etalónov. V prípade, že niektorý z excelovských súborov neobsahuje dostatočný počet etalónov podľa VDA 5 (to znamená menej ako 3 etalóny), užívateľ bude na tento fakt upozornený. To isté platí aj v prípade, že je v stĺpcoch excelovských súborov zapísaných menej ako 10 hodnôt. Vo všetkých stĺpcoch musí byť rovnaký počet hodnôt.

6.6.2 Štatistické spracovanie dát z kapitoly 6.4 a čiastkové závery

V tejto podkapitole sú detailnejšie spracované surové dáta zo sondy doplnené o dielčie závery. Rozlíšenie meraní etalónov pri použití LTC bola jedna stotina mikrometru. Pri všetkých ostatných meraniach bolo rozlíšenie jedna desatina mikrometru. Predpokladá sa, že najnižšie intervaly spoľahlivosti budú dosiahnuté pri kompenzácii pomocou LTC. Druhou najpresnejšou metódou by mala byť kombinácia kompenzácie pomocou DBB a LI. Treťou by mala byť kompenzácia pomocou LI. Najmenšia hodnota intervalu tolerancie spôsobilosti sa predpokladá pre stroj s vypnutými kompenzáciami.

<u>Ustavenie v osi x pre z=130 mm</u>

Výsledné hodnoty tejto konfigurácie stroja sú zobrazené na nasledujúcom obrázku.



Obr. 73) Vyhodnotenie pokusu v osi x vo výške 130 mm

Zrejme najvýraznejšou krivkou je tá, ktorá reprezentuje pokus s vypnutými kompenzáciami. Hodnota tolerancie spôsobilosti tohto pokusu pre etalón o dĺžke 500 milimetrov dosahuje zhruba 5 milimetrov. Pri takejto vysokej hodnote tolerancie spôsobilosti je stroj prakticky nepoužiteľný na meranie akéhokoľvek obrobku. Ak sa však pozrieme do kapitoly 6.5.1 do tabuľky číslo 7, zistíme, že pre daný etalón v pokuse číslo 6 je hodnota nižšia oproti ostatným zhruba o pol milimetra. To mohlo byť zapríčinené rôznymi faktormi. Napríklad



vniknutím nečistoty medzi obrobkovú sondu a etalón, prípadne otrasom spôsobeným prácami v hale (v dobe merania bol odvážaný z laboratória UVSSR jeden stroj). Každopádne nie je pravdepodobné, že je táto hodnota správna. Preto bola nahradená aritmetickým priemerom ostatných meraní. Graf takto upravených nameraných hodnôt môžete vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obr. 74) Vyhodnotenie pokusu v osi x vo výške 130 mm po štatistickej úprave

Po úprave nameraných hodnôt sa interval spôsobilosti problémového merania skrátil na necelé štyri desatiny milimetra. Spolu s etalónom o dĺžke 300 milimetrov boli pri konfigurácii s vypnutými kompenzáciami dosiahnuté najvyššie hodnoty tolerancie spôsobilosti. Paradoxne, pri etalónoch o dĺžke 100 milimetrov a 150 milimetrov vyšiel stroj s vypnutými kompenzáciami ako najpresnejší a pri použití kompenzácií došlo u nich k niekoľkonásobnému zvýšeniu intervalu tolerancie spôsobilosti. To je zrejme spôsobené tým, že v blízkom okolí týchto etalónov prebiehala kalibrácia sondy práve pri vypnutých kompenzáciách (popísaná v kapitole 6.3). S rastúcou dĺžkou meraných etalónov sa zväčšovala vzdialenosť miest merania od miesta kalibrácie sondy. Dá sa predpokladať, že keby boli premeriavané aj dlhšie etalóny, krivka vypnutých kompenzácií by si na rozdiel od ostatných kriviek držala výrazný rastúci trend. Konfigurácia, kde došlo ku kompenzácii pomocou LI dosahuje v prvých troch etalónoch takmer identické hodnoty, ako konfigurácia, kde boli naraz použité kompenzácie LI a DBB. Je to spôsobené tým, že merania prebehli takmer identickej výške, v akej boli vykonávané kompenzácie kolmostí pomocou DBB. Kompenzácia kolmostí sa tak prakticky nemala ako prejaviť na výsledkoch. Predpokladá sa, že sa konfigurácia pomocou LI a súčasne DBB ukáže byť výhodnejšia pri meraní vo väčšej vzdialenosti v ose z od miesta, kde prebehla kompenzácia kolmostí.

<u>Ustavenie v osi x pre z=295mm</u>

Pre všetky konfigurácie okrem LTC boli premeriavané štyri etalóny. Pri LTC konfigurácii bolo premeraných šesť etalónov. Graf výsledkov daného pokusu je zobrazený na nasledujúcom obrázku.



Obr. 75) Vyhodnotenie pokusu v osi x vo výške 295 mm

Na rozdiel od predchádzajúceho ustavenia sa v grafe nenachádzajú žiadne anomálie. Stroj s vypnutými kompenzáciami dosiahol okrem jedného etalónu vždy najväčšiu hodnotu tolerancie spôsobilosti. Za zmienku stojí fakt, že konfigurácia, kde bol použitý iba LI dopadla v troch etalónoch nečakane lepšie, ako konfigurácia s LI v kombinácii s DBB. Predpoklad, že vďaka kompenzácii kolmosti budú vo väčšej výške dosiahnuté lepšie výsledky nebol naplnený. *Ustavenie v osi z*

Pri všetkých konfiguráciách došlo k premeraniu troch etalónov. Výsledky pokusu sú zobrazené na nasledujúcom obrázku.




V tomto jedinom pokuse boli dokonale naplnené všetky predpoklady merania. Poradie veľkostí intervalov spoľahlivosti pre jednotlivé etalóny vždy zodpovedalo komplexnosti použitej kompenzačnej metódy. Obzvlášť pri kompenzácii pomocou LaserTRACER-a boli dosiahnuté výrazne lepšie výsledky vo všetkých bodoch.



7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA

Znie logicky, keď sa povie, že pri spresnení obrábania pomocou elektronickej kompenzácie sa spresní aj meranie pomocou obrobkovej sondy. Pomocou spracovania čiastkových cieľov sa podarilo v tejto práci toto tvrdenie potvrdiť. Obzvlášť zaujímavé výsledky vyšli pre ustavenie etalónov v osi *x* vo výške 130 milimetrov, kde dopadol stroj s vypnutými kompenzáciami v dvoch prípadoch paradoxne najlepšie spomedzi všetkých konfigurácií. S najvyššou pravdepodobnosťou to bolo spôsobené tým, že bola pred meraním sonda skalibrovaná práve pri vypnutých kompenzáciách v blízkosti ustavenia týchto etalónov. Tomuto tvrdeniu napomáha aj fakt, že sa tento jav neopakoval v ostatných dvoch ustaveniach, v ktorých stroj s vypnutými kompenzáciami dopadol až v šiestich prípadoch najhoršie a v jednom prípade skončil ako druhý najhorší.

Skúmanie tohto javu by sa teoreticky mohlo stať predmetom ďalšej diplomovej práce. V nej by sa mohol skúmať napríklad vplyv geometrických chýb a vzdialenosti miesta kalibrácie sondy na jej presnosť. Prípadne by sa mohla sonda kalibrovať pri použití niektorého typu kompenzácie a skúmal by sa teda vplyv použitej konfigurácie pri kalibrovaní sondy na jej presnosť. K vyhodnoteniu takéhoto výskumu by mohol pomôcť skript v Matlabe, ktorý je súčasťou tejto práce (viď príloha).

8 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto práce bolo poukázať na dôležitosť elektronickej kompenzácie a geometrickej presnosti stroja pri dĺžkovom meraní pomocou obrobkovej sondy. Stanovila sa hypotéza, že existuje korelácia medzi komplexnosťou elektronickej kompenzácie a veľkosťou tolerancie, v ktorej je sonda spôsobilá spoľahlivo merať obrobky. Hlavným cieľom tejto práce bolo túto hypotézu potvrdiť (respektíve vyvrátiť).

Predložená práca je rozdelená do dvoch základných častí. Prvá časť je zameraná na teóriu a pojednáva o súčasnom stave používanej meracej techniky. Druhá časť sa venuje praktickému experimentálnemu riešeniu.

V kapitole 3 bola vytvorená rešerš zaoberajúca sa členením obrobkových sond z hľadiska ich konštrukcie a princípu fungovania. Na záver tejto kapitoly bola vytvorená rešerš čerpajúca z odborných článkov zaoberajúcimi sa chybami vzniknutými pri meraní pomocou obrobkových sond.

Kapitola 4 je venovaná príkladom meraní pomocou obrobkových sond. Bolo v nej poukázané na možnosti merania rovinných a valcových plôch prípadne dĺžok.

Kapitola 5 pojednáva o princípoch posudzovania geometrickej a volumetrickej presnosti obrábacích strojov. V tejto kapitole boli popísané prístroje, ktoré boli použité v experimentálnej časti. Jedná sa konkrétne o double ballbar, laser interferometer a LaserTRACER

V kapitole 6 došlo na základe systémového rozboru problematiky k návrhu experimentu. Ten bol navrhnutý tak, aby jeho výstupy boli schopné potvrdiť či vyvrátiť skúmanú hypotézu. Boli teda zvolené ustavenia etalónov v dvoch výškach osi *x* a jedno v osi *z*. Po nameraní potrebných hodnôt došlo k ich štatistickému vyhodnoteniu podľa normy VDA 5. Pre potreby spracovania dát bol vytvorený skript v softvéri Matlab. Skript extrahoval namerané hodnoty zapísané do excelovských tabuliek uložených v počítači a jeho výstupom bol graf veľkosti tolerancie spôsobilosti merania pomocou sondy v závislosti na dĺžke premeriavaných etalónov. Skript bol spustený pre každé ustavenie zvlášť. Na konci kapitoly boli na základe skriptu vygenerované grafy pre všetky tri ustavenia etalónov. Zo získaných grafov boli vyvodené čiastkové závery pre jednotlivé ustavenia. Na základe týchto záverov je možné bezpečne prehlásiť, že skúmaná hypotéza je potvrdená.

FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů

INŽENÝRSTVÍ a robotiky

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

[1] Vlastnosti kinematických sond od spoločnosti Renishaw. In: *Renishaw* [online]. c2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/standardni-sondy-pro-obrabeci-stroje--32926

[2]Snímací systémy pro CNC obráběcí stroje. Renishaw [online]. c2001-2017 [cit. 2020-
06-23].Dostupnéz:

https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/652050b1403b4ea2927d69c8643876c6.pdf

[3] Princíp tenzometrickej sondy. In: *Renishaw* [online]. c2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/technologie-obrobkovych-sond--32933

příručka [4] Kapesní 0 řešeních pomocí sond pro CNC obráběcí stroje. Renishaw [online]. 2012 [cit. 2020-06-19]. Dostupné Z: http://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/8b4198b971424c4c9b5345f9b75e9cd8.pdf

[5] Guľôčkový dotyk sondy. In: *Renishaw* [online]. c 2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/typy-doteku--6627

[6] Hviezdicová sonda. In: *Renishaw* [online]. c 2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/doteky-pro-sondy-zeiss--6636

[7] Guľôčkový dotyk sondy s kĺbovým spojom. In: *Renishaw* [online]. c 2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/zdokonalena-dostupnost-merenych-prvku-pro-system-petioseho-mereni-revo-a-nove-funkce-pro-merici-software-modus-pro-souradnicove-merici-stroje-na-veletrhu-emo-2019--44800

[8] Polguľový dotyk sondy. In: *Renishaw* [online]. c 2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/doteky-spolecnosti-renishaw--18675

[9] Diskový dotyk sondy. In: *Renishaw* [online]. c 2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/typy-doteku--6627

[10] Materiály dotykov obrobkových sond. *Renishaw* [online]. c2001-2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/materialy-doteku--6423

[11] Sondový upínač HSK od Renishaw. In: *Renishaw* [online]. c 2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.com/shop/Product.aspx?Product=M-2045-0188

[12] Sondový upínací kužel DIN od Renishaw. In: *Renishaw* [online]. c 2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.com/shop/Product.aspx?Product=A-4038-0232&lang=cs

[13] JANOWSKI, Michal a Adam WOŹNIAK. Mechanical model of errors of probes for numerical controlled machine tools. *Measurement* [online]. 2015, 23.9.2015, **77**, 317-326 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.09.023. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/282528571_Mechanical_model_of_errors_of_p robes_for_numerical_controlled_machine_tools

[14] WOŹNIAK, Adam a Katarzyna MĘCZYŃSKA. *Measurement hysteresis of touch-trigger probes for CNC machine tools* [online]. 2020, 3.2.2020, **156**(107568) [cit. 2020-06-18]. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107568. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120301056#!

[15] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.

[16] MAREK, Jiří. Kompenzace geometrické přesnosti. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Verze DMG MORI. Praha: MM Publishing, 2019, s. 324. ISBN 978-80-907452-0-9.

[17] Double ballbar. In: *Renishaw* [online]. c2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/system-ballbar-qc20-w--11075

[18] Laser interferometer XL-80 od spoločnosti Renishaw. In: *Renishaw* [online]. c 2001-2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/xl-80-mobilita-presnost-a-snadne-pouziti-laseroveho-interferometrickeho-mericiho-systemu--7940

[19] Vlastnosti laser interferometru XL-80. *Renishaw* [online]. c2001-2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/laserovy-system-xl-80--8268

[20] LTC od spoločnosti Etalon. In: *Etalon* [online]. Biberweg [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.etalon-gmbh.com/en/products/lasertracer/

[21] Program Trac-Cal. *Přístroje pro měření a metrologii PRIMA BILAVČÍK s.r.o.* [online]. Uherský Brod, c2014 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.merici-pristroje.cz/clanky/detail/kontrola-kalibrace-a-kompenzace-souradnicovych-mericich-stroju-zarizenim-lasertracer-od-spolecnosti-etalon.htm

[22] Frézka MCV 754 QUICK. In: *Kovosvit* [online]. Sezimovo Ústí, c2016 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html

[23] NĚMĚČEK, Pavel. Vhodnost kontrolních procesů: vhodnost měřicích systémů, vhodnost procesů měření a kontroly, rozšířená nejistota, posuzování shody. 2. vydání. Praha: Česká společnost pro jakost, 2011. Management jakosti v automobilovém průmyslu. ISBN 978-80-02-02307-4.

10 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK

10.1 Zoznam skratiek

CNC	Počítačové číslicové riadenie
DBB	Double ballbar
LI	Laser interferometer
LTC	LaserTRACER
ÚVSSR	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
VUT	Vysoké učění technické

10.2 Zoznam symbolov

Α	[-]	Konštanta stykových materiálov sondy a obrobku
a	[mm]	Vzdialenosť osi stopky sondy od kinematického hniezda
B_i	[mm]	Systematická odchýlka
C_g	[-]	Index potenciálu meracieho systému
C_{gk}	[-]	Index spôsobilosti meracieho systému
CR	$\left[\frac{\mu m}{N}\right]$	Faktor popisujúci tuhosť stopky pri namáhaní na ohyb
D_T	[mm]	Priemer meracej guličky
E_1	[GPa]	Youngov modul guličky
E_2	[GPa]	Youngov modul obrobku
f	[N]	Koeficient trenia medzi valčekom a guličkami v kinematickom hniezde
Fs	[N]	Sila predopnutia pružiny kinematickej sondy
F_T	[N]	Normálová sila od dotyku sondy
H_1	[mm]	Chyba spôsobená hysteréziou v smere 1
H_2	[mm]	Chyba spôsobená hysteréziou v smere 2
Η	[mm]	Celková chyba spôsobená hysteréziou
h_e	[mm]	Axiálne stlačenie pružiny potrebné na prerušenie obvodu
h_1	[mm]	Zdvih potrebný na aktiváciu kinematickej sondy v smere 1
h_2	[mm]	Zdvih potrebný na aktiváciu kinematickej sondy v smere 2
k	$\left[\frac{N}{mm}\right]$	Tuhosť pružiny kinematickej sondy
L	[mm]	Dĺžka stopky
l	[mm]	Dĺžka etalónu
т	[kg]	Hmotnosť pohyblivej časti kinematického mechanizmu a stopky
R	[mm]	Polomer guličky sondy
R_S	[mm]	Zakrivenie meraného telesa
S	[mm]	Zdvih potrebný na dosiahnutie kľudovej polohy sondy
S_g	[mm]	Smerodajná odchýlka
TOL	[mm]	Tolerancia v ktorej je stroj spôsobilý merať
ν	[s]	Rýchlosť sondy počas merania
$WD(\alpha,\beta)$	[mm]	Chyba spôsobená deformáciou stopky
$WE(\alpha,\beta)$	[mm]	Chyba zopnutia obvodu
<i>WH(α,β)</i>	[mm]	Chyba spôsobená deformáciou dotykového telieska

WI(α,β)	[mm]	Chyba oneskorenia sondy
χ_m	[mm]	Hodnota referenčného etalónu
$\overline{x_g}$	[mm]	Aritmetický priemer
α_n	[°]	Uhlová chyba zrovnania etalónov v rovine XZ
β	[°]	Naklonenie ???
β_n	[°]	Uhlová chyba zrovnania etalónov v rovine XY
Δ	[mm]	Chyba guľôčkovej sondy pri meraní tenkého kusu
∆celk	[mm]	Celková chyba merania spôsobená nedokonalým zrovnaním
ΔET_XY	[mm]	Rozdiel hodnôt z indikátoru na koncoch etalónov v rovine XY
Δ_{ET_XZ}	[mm]	Rozdiel hodnôt z indikátoru na koncoch etalónov v rovine XZ
<i>∆klop</i>	[mm]	Celková chyba dotyku spôsobená naklopením dotykovej plochy
⊿rot	[mm]	Celková chyba spôsobená natočením etalónu
Δ_{ROTXY}	[mm]	Chyba spôsobená natočením etalónu v rovine XY
⊿rotxz	[mm]	Chyba spôsobená natočením etalónu v rovine XZ
$\Delta x y$	[mm]	Chyba spôsobená naklopením dotykovej plochy v rovine XY
Δxz	[mm]	Chyba spôsobená naklopením dotykovej plochy v rovine XZ
τ	[s]	Doba medzi aktiváciou sondového transduktora a vygenerovaním signálu

10.3 Zoznam obrázkov

OBR. 1) KONŠTRUKCIA KINEMATICKEJ SONDY	
OBR. 2) ELEKTRICKÝ PRÚD V KINEMATICKOM HNIEZDE	19
OBR. 3) PRINCÍP TENZOMETRICKEJ SONDY[3]	20
OBR. 4) GUĽÔČKOVÝ DOTYK SONDY[5]	22
OBR. 5) HVIEZDICOVÁ SONDA[6]	22
OBR. 6) GULIČKOVÁ SONDA S KĹBOVÝM SPOJOM[7]	22
OBR. 7) MERANIE TENKÉHO TELESA GUĽÔČKOVOU SONDOU	23
OBR. 8) MERANIE TENKÉHO TELESA VALCOVOU SONDOU	23
OBR. 9) POLGUĽOVÝ DOTYK SONDY[8]	23
OBR. 10) DISKOVÝ DOTYK[9]	24
OBR. 11) SONDOVÝ UPÍNAČ HSK OD RENISHAW[11]	25
OBR. 12) SONDOVÝ UPÍNACÍ KUŽEL DIN OD RENISHAW[12]	25
OBR. 13) HYSTERÉZIA V SMERE 1	27
OBR. 14) HYSTERÉZIA V SMERE 2	27
OBR. 15) VERTIKÁLNE MERANIE SONDOU	29
OBR. 16) HORIZONTÁLNE MERANIE SONDOU	29
OBR. 17) HĽADANIE STREDU KRUŽNICE POMOCOU SONDY	30
OBR. 18) MERANIE ÚHLU POMOCOU SONDY	30
OBR. 19) VYCHÝLENIE SÚRADNICOVÉHO SYSTÉMU	30
OBR. 20) DIAGNOSTIKA STROJA POMOCOU DOUBLE BALLBARU[1'	7]31

FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

ſ

OBR. 21) APLIKÁCIA INTERFEROMETRA V HORIZONTÁLNEJ OSI
OBR. 22) APLIKÁCIA INTERFEROMETRA VO VERTIKÁLNEJ OSI
OBR. 23) LASER-INTERFEROMETER XL-80 OD SPOLOČNOSTI RENISHAW[18]
OBR. 24) POUŽITÁ KOMPENZAČNÁ JEDNOTKA XC-80 OD SPOLOČNOSTI RENISHAW
OBR. 25) LTC OD SPOLOČNOSTI ETALON[20]
OBR. 26) FRÉZKA MCV 754 QUICK OD SPOLOČNOSTI KOVOSVIT[22]37
OBR. 27) PREDĹŽENIE ETALÓNU SPÔSOBENÉ NAKLOPENÍM
OBR. 28) ODVODENIE PREDĹŽENIA ETALÓNU SPÔSOBENÉ NAKLOPENÍM V JEDNEJ ROVINE
OBR. 29) ODVODENIE PREDĹŽENIA ETALÓNU SPÔSOBENÉ NAKLOPENÍM V DVOCH ROVINÁCH40
OBR. 30) GRAF PREDĹŽENIA ETALÓNU V ZÁVISLOSTI NA CHYBE ZROVNANIA41
OBR. 31) SKRÁTENIE ETALÓNU VPLYVOM JEHO NEDOKONALÉHO ZROVNANIA V JEDNEJ41
OBR. 32) SKRÁTENIE ETALÓNU VPLYVOM JEHO NEDOKONALÉHO ZROVNANIA V DVOCH ROVINÁCH
OBR. 33) ZÁVISLOSŤ SKRÁTENIA ETALÓNU OD CHYBY ZROVNANIA42
OBR. 34) ZÁVISLOSŤ CELKOVEJ CHYBY NA DĹŽKE ETALÓNU43
OBR. 35) USTAVOVANIE ETALÓNOV VO VÝŠKE 130 MILIMETROV44
OBR. 36) ZROVNÁVANIE ĽAVÉHO BOČNÉHO KONCA ETALÓNU44
OBR. 37) ZROVNÁVANIE PRAVÉHO BOČNÉHO KONCA ETALÓNU44
OBR. 38) VYPODLOŽENIE PRÍPRAVKU DO VÝŠKY 295 MILIMETROV45
OBR. 39) MERANIE ETALÓNOV V OSI Z
OBR. 40) HĽADANIE STREDU KALIBRAČNÉHO KRÚŽKU
OBR. 41) NÁJDENIE STREDU KALIBRAČNÉHO KRÚŽKU46
OBR. 42) ZISK SUROVÝCH DÁT - PRÍPRAVA STROJA A KOMPENZÁCIA POMOCOU LI
OBR. 43) ZISK SUROVÝCH DÁT - KOMPENZÁCIA POMOCOU DBB A LI47
OBR. 44) ZISK SUROVÝCH DÁT - KOMPENZÁCIA POMOCOU LTC48
OBR. 45) ZISK SUROVÝCH DÁT - PREMERIAVANIE ETALÓNOV48
OBR. 46) SPÔSOB PREMERIAVANIA ETALÓNOV V OSI X49
OBR. 47) SPÔSOB PREMERIAVANIA ETALÓNOV V OSI Z49
OBR. 48) DIAGNOSTIKA OSI X
OBR. 49) DIAGNOSTIKA OSI Y
OBR. 50) DIAGNOSTIKA OSI Z

OBR. 51) CHYBA POLOHOVANIA OSI X PRED KOMPENZÁCIOU (MODRÁ) A PO KOMPENZÁCII (FIALOVÁ)52
OBR. 52) CHYBA POLOHOVANIA OSI Y PRED KOMPENZÁCIOU (MODRÁ) A PO KOMPENZÁCII (FIALOVÁ)53
OBR. 53) CHYBA POLOHOVANIA OSI Z PRED KOMPENZÁCIOU (MODRÁ) A PO KOMPENZÁCII (FIALOVÁ)54
OBR. 54) DIAGNOSTIKA DBB V ROVINE XY
OBR. 55) KALIBRAČNÁ DIAGNOSTIKA POMOCOU DBB V ROVINE XY57
OBR. 56) VERIFIKAČNÁ DIAGNOSTIKA POMOCOU DBB V ROVINE XY57
OBR. 57) DIAGNOSTIKA DBB V ROVINE XZ
OBR. 58) KALIBRAČNÁ DIAGNOSTIKA POMOCOU DBB V ROVINE XZ58
OBR. 59) VERIFIKAČNÁ DIAGNOSTIKA POMOCOU DBB V ROVINE XZ58
OBR. 60) DIAGNOSTIKA DBB V ROVINE YZ
OBR. 61) KALIBRAČNÁ DIAGNOSTIKA POMOCOU DBB V ROVINE YZ59
OBR. 62) VERIFIKAČNÁ DIAGNOSTIKA POMOCOU DBB V ROVINE YZ59
OBR. 63) CHYBA POLOHOVANIA OSI X PRED KOMPENZÁCIOU (MODRÁ) A PO KOMPENZÁCII (FIALOVÁ)60
OBR. 64) CHYBA POLOHOVANIA OSI Y PRED KOMPENZÁCIOU (MODRÁ) A PO KOMPENZÁCII (FIALOVÁ)61
OBR. 65) CHYBA POLOHOVANIA OSI Z PRED KOMPENZÁCIOU (MODRÁ) A PO KOMPENZÁCII (FIALOVÁ)62
OBR. 66) KALIBRAČNÉ MERANIE POMOCOU LTC65
OBR. 67) VERIFIKAČNÉ MERANIE POMOCOU LTC65
OBR. 68) PRVKY OVPLYVŇUJÚCE SYSTÉM MERANIA67
OBR. 69) INTERVAL TOLERANCIE SPÔSOBILOSTI SYSTÉMU67
OBR. 70) POSTUP PRI VYHODNOCOVANÍ DÁT PODĽA VDA 568
OBR. 71) POSTUP PRI ZÁPISE HODNÔT DO EXCELU69
OBR. 72) PRÍKLAD VÝSTUPU ZO SKRIPTU69
OBR. 73) VYHODNOTENIE POKUSU V OSI X VO VÝŠKE 130 MM70
OBR. 74) VYHODNOTENIE POKUSU V OSI X VO VÝŠKE 130 MM PO ŠTATISTICKEJ ÚPRAVE
OBR. 75) VYHODNOTENIE POKUSU V OSI X VO VÝŠKE 295 MM72
OBR. 76) VYHODNOTENIE POKUSU V OSI Z72

10.4 Zoznam tabuliek

TAB 1)	KINEMATICKÉ SONDY OD SPOLOČNOSTI RENISHAW [1]20
TAB 2)	TENZOMETRICKÉ SONDY OD SPOLOČNOSTI RENISHAW[4]21
TAB 3)	ZÁKLADNÉ PARAMETRE INTERFEROMETRU XL-80[19]33
84	

FAKULTA ústav výrobních strojů, STROJNÍHO systémů INŽENÝRSTVÍ a robotiky

ſ

TAB 4) PARAMETRE LTC OD FIRMY ETALON[20]
TAB 5) PARAMETRE STROJA, NA KTOROM BOLI VYKONÁVANÉ POKUSY[22]
TAB 6) UHLOVÉ CHYBY SPÔSOBENÉ ZLÝM ZROVNANÍM VO VÝŠKACH130 A 295 MILIMETROV
TAB 7)VÝSLEDKY MERANÍ V OSI X VO VÝŠKE 130 MM – VYPNUTÉ KOMPENZÁCIEKOMPENZÁCIE
TAB 8) VÝSLEDKY MERANÍ V OSI X VO VÝŠKE 295 MM – VYPNUTÉ KOMPENZÁCIE
TAB 9) VÝSLEDKY MERANÍ V OSI Z – VYPNUTÉ KOMPENZÁCIE
TAB 10) PARAMETRE PRED A PO KOMPENZÁCII POMOCOU LI V OSI X53
TAB 11) PARAMETRE PRED A PO KOMPENZÁCII POMOCOU LI V OSI Y54
TAB 12) PARAMETRE PRED A PO KOMPENZÁCII POMOCOU LI V OSI Z55
TAB 13) VÝSLEDKY MERANÍ V OSI X VO VÝŠKE 130MM PRI KOMPENZÁCII POMOCOU LI
TAB 14) VÝSLEDKY MERANÍ V OSI X VO VÝŠKE 295 MM PRI KOMPENZÁCII POMOCOU LI
TAB 15) VÝSLEDKY MERANÍ V OSI Z PRI KOMPENZÁCII POMOCOU LI 56
TAB 16) VPLYV KOMPENZÁCIE DBB NA KOLMOSŤ OSÍ
TAB 17) VPLYV KOMPENZÁCIE DBB NA CHYBU POLOHOVANIA
TAB 18) PARAMETREZLEPŠENÉPOMOCOULIV OSIXPOKOMPENZÁCII KOLMOSTÍ
TAB 19) PARAMETRE ZLEPŠENÉ POMOCOU LI V OSI Y PO KOMPENZÁCIIKOLMOSTÍ
TAB 20) PARAMETRE ZLEPŠENÉ POMOCOU LI V OSI Z PO KOMPENZÁCII
KOLMOSTÍ



11 ZOZNAM PRÍLOH

Skript v Matlabe vyhodnocujúci pokusy podľa VDA 5 Kalibračný list etalónov z Českého metrologického inštitútu Vzorová prázdna tabuľka pre zapisovanie hodnôt Excelovské tabuľky s nameranými hodnotami Údaje z Ballbar 20 Údaje z Trac-Cal Údaje z Carto Explore



PRÍLOHY

```
Skript v matlabe vyhodnocujúci merania podľa VDA 5
clc;
clear;
% nastavenie vypisovania na 4 cisla za desatinnov ciarkov
format long;
% deklaracia premenných
% Rozlíšenie sondy
Inkrement tolerancie=0.0005;
% Index potencialu meracieho systému je pre nasu sustavu stanoveny na
% hodnotu 1,33 podla normy VDI5
Cq=1.33;
% Vytvorenie vektoru obsahujúceho rôzne tvary grafu
Tvar grafu={':bs','--go',':rx','-c*',':mp','-yd',':kv','-bv',':gd','-
rp', .: cx', '-m*', ': yo', '-ks'};
%Vyzvanie používateľa k zadaniu cesty k pracovnej zložke
cesta=input('Zadajte cestu k zložke s excelovskými formulármi nameraných
hodnôt: ','s');
% Zmenenie cesty ku Current folder
cesta hodnot= dir(cesta);
% Odstranenie bodiek pri vektore názvov excelov
cesta hodnot(ismember( {cesta hodnot.name}, {'.', '..'})) = [];
% Vytvorenie vektoru s názvami jednotlivých súborov(bude použíté pre
legendy grafu)
Vektor nazvov excelu={cesta hodnot.name};
% V ďalších dvoch riadkoch odstránim z predchádzajúceho vektoru koncovky
% xlsx. Novovzniknutý vektoru bude slúžiť na prehladnejšie vypísanie
% legiend do grafu
Nechcena koncovka='.xlsx';
Vektor nazvov excelu bez pripon=strrep(Vektor nazvov excelu,Nechcena koncov
ka,'');
disp('Počet súborov vo vybranej zložke je: ')
disp(length(Vektor nazvov excelu))
Pocet excelovskych suborov=length(Vektor nazvov excelu);
% Presmerovanie cesty zdrojoveho suboru
path(path, cesta);
% Získanie vektoru popisujúceho počty etalónov v jednotlivých pokusoch(bude
dôležité neskôr)
for u=1:Pocet excelovskych suborov
      [data, textdata]=xlsread(char(Vektor nazvov excelu(u)));
      Matica_hodnot=data;
      Vektor poctov etalonov(u)=length(Matica hodnot(1,:))-1;
end
% Vytvorenie nulových matíc, do ktorých budeme zapisovať hodnoty
tolerancií,
% smerodajných odchyliek a aritmetických priemerov stlcov
% Matica je vytvorená tak, aby mala rozmery vyhovojúce akurát súboru s
% najväčším možným počtom etalónov
TOL=zeros(Pocet excelovskych suborov,max(Vektor poctov etalonov));
Smerodatne odchylky=zeros (Pocet excelovskych suborov, max (Vektor poctov etal
onov));
Matica aritmetickych priemerov stlpcov=zeros(Pocet excelovskych suborov,max
(Vektor poctov etalonov));
%Matica hodnot=[0];
```

for o=1:Pocet_excelovskych_suborov

```
[data, textdata]=xlsread (char(Vektor nazvov excelu(o)));
    Matica hodnot=data;
    % Zistím počet riadkov a stĺpcov v danom meraní.
    % V našom prípade počet stĺpcov reprezentuje počet použitých etalónov v
    % pokuse je vo forme vektoru
    Pocet stlpcov(o)=length(Matica hodnot(1,:))-1;
    %Pocet riadkov reprezentuje pocet merani na jednom etalone
    Pocet riadkov=length(Matica hodnot(:,1))-1;
    % Vytvorenie upozornenia na nedostatočný počet meraní a etalónov podľa
    % danej normy
    if Pocet stlpcov(o)<3
        disp('V pokuse ')
        disp(char(Vektor nazvov excelu(o)))
        disp('bol podľa normy VDA 5 zmeraný nedostatočný počet etalónov')
    end
    if Pocet riadkov<10</pre>
        disp('V pokuse ')
        disp(char(Vektor nazvov excelu(o)))
        disp('bol podľa normy VDI 5 zmeraný nedostatočný počet meraní')
    end
    % Pre neskoršie aplikácie je treba vytvoriť vektor dĺžok etalónov,
    % ktorý poslúži pri finálnom vyhodnocovaní
    for s=1:(Pocet stlpcov(o))
    Vektor dlzok etalonov(s)=Matica hodnot(1,s+1);
    end
    %Vytvojenie prázdneho vektora o správnej veľkosti, do ktoreho budem
    % zapisovať súčet stĺpcov
    Sucet stlpca=zeros(1,Pocet stlpcov(o));
    for i=2:(Pocet stlpcov(o)+1);
        for j=2:(Pocet_riadkov+1);
        Sucet stlpca(i-1)=Sucet stlpca(i-1)+Matica hodnot(j,i);
        end
    end
    %Vytvojenie vektoru aritmetických priemerov stĺpcov
    for i=1:Vektor poctov etalonov(o)
    Aritmeticke priemery stlpcov(o,i)=Sucet stlpca(i)/Pocet riadkov;
    end
    % Vytvorenie pomocnej premennej na výpočet smerodajných odchyliek
    Suma k odchylke=zeros(1,Pocet stlpcov(o));
for L=2:(Pocet stlpcov(o)+1);
    for m=2:(Pocet riadkov+1);
        %Vypocet sumy rozptylu
    Suma k odchylke(L-1)=Suma k odchylke(L-
1)+(Aritmeticke priemery stlpcov(o,L-1)-Matica hodnot(m,L))^2;
   end
end
% Výpočet samotnej smerodajnej odchýlky
for L=1:Pocet stlpcov(0)
Smerodatne odchylky(o,L)=sqrt((1/(Pocet riadkov-1))*Suma k odchylke(L));
end
TOL1(o,:) = (4*Cg*Smerodatne odchylky(o,:))/0.2;
% Vytvorenie matice tolerancii, kde počet riadkov reprezentujú počet
konfigurácii
% stroja a počet stĺpcov reprezentujú počty etalónov.
for p=1:Pocet stlpcov(o)
TOL(o,p) = TOL1(o,p);
end
% Vytvorenie vektoru aktuálnych tolerancií potrebných pre vykreslenie grafu
% podľa normy VDI 5.
for x=1:Pocet stlpcov(o);
```

```
FAKULTA ústav výrobních strojů,
     STROJNÍHO systémů
    INŽENÝRSTVÍ a robotiky
    Systematicke_odchylky(o,x)=abs(Matica hodnot(1,x+1)-
Aritmeticke priemery stlpcov(o,x));
    Cgk(o, x) = ((0.1 * TOL(o, x)) -
(Systematicke odchylky(o,x)))/(2*Smerodatne odchylky(o,x));
while (((0.1*TOL(0,x))-
(Systematicke odchylky(o,x)))/(2*Smerodatne odchylky(o,x)))<1.33
    TOL(o,x) = (TOL(o,x) + Inkrement tolerancie);
end
% Zapísanie tolerancoí do matice
 for t=1:Pocet stlpcov(0)
       Aktualne tolerancie(t)=TOL(o,t);
   end
end
% Vykreslenie grafu
plot(Vektor dlzok etalonov, Aktualne tolerancie, Tvar grafu{o}, 'linewidth', 2.
6)
% Nastavenie veľkosti popisiek osí
set(gca, 'fontsize', 24);
% Nastavenie popiskov osí a veľkosti popisiek
xlabel('Dĺžka etalónov[mm]','fontsize',28)
ylabel('Hodnota tolerancie[mm]', 'fontsize', 28)
% Nastavenie legiend - extrahovanie legiend z názvov excelu
legendy{0}=sprintf(char(Vektor nazvov excelu bez pripon(0)));
hold on;
% Nastavenie veľkostí legiend
hold on
% Niektoré parametre je treba na konci cyklu vynulovať
Aktualne_tolerancie=[0];
Vektor dlzok etalonov=[0];
Suma k odchylke=[0];
Sucet stlpca=[0];
end
legend(legendy,'Location', 'northoutside', 'NumColumns', 1, 'FontSize', 24)
hold off
% Kontrolné vypísanie matíc dôležitých údajov merania
TOL
TOL1
Cgk
Systematicke odchylky
Aritmeticke priemery stlpcov
Smerodatne odchylky
```