

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

Měření výrobků ve výrobním procesu na stroji Zeiss C400

Bakalářská práce

Jakub Sedlák

Školitel: Ing. Michal Šerý Ph.D.

České Budějovice 2020

Bibliografické údaje

Sedlák, J., 2020: Měření výrobku ve výrobním procesu na stroji Zeiss C400. [Product measurement in production process on Zeiss C400. Bc. Thesis, in Czech] – 60 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech republic.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku nejistot měření výrobku na stroji Zeiss C400. Cílem práce je minimalizace nejistot měření popsáním metodiky měření.

Anotation

The bachelor thesis is focused on the uncertainty of product measurement on the Zeiss C400 machine. The aim of this work is to minimize measurement uncertainties by describing the measurement methodology.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury

Prohlašuji, že v souladu s §47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledky obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne

Podpis autora.....

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval panu Ing. Michal Šerý, Ph.D. za jeho odborné vedení při psaní této bakalářské práce. Rád bych také poděkoval celému podniku Motor JIKOV, především pak panu Ing. Radomíru Hroudovi, za umožnění vzniku této bakalářské práce.

Obsah

Úvod	8
1 Konstrukce CMM.....	9
1.1 Historie.....	9
1.2 Uspořádání CMM	9
1.2.1 Kartézsky uspořádaný CMM	9
1.2.2 Nekartézsky uspořádaný CMM.....	10
1.3 Části CMM	11
1.3.1 Základní části CMM.....	11
1.3.2 Vedení pohyblivých částí.....	12
1.3.3 Pohon.....	12
1.4 Měřicí sonda	14
1.4.1 Kinematická sonda	14
1.4.2 Tenzometrická sonda.....	17
1.4.3 Skenovací doteková sonda	18
1.4.4 Doteky	18
1.5 Odměřovací systém CMM.....	19
1.5.1 Optické systémy	20
1.5.2 Rotační enkodér.....	21
1.5.3 Induktosynové systémy	22
1.5.4 Magnetické systémy	23
1.5.5 Interferometry.....	23
2 Software.....	24
3 Princip souřadnicového měření	26
3.1 Analýza výkresové dokumentace	27
3.2 Upnutí	27
3.3 Kalibrace	27

3.4 Vyrovnání.....	28
3.4.1 Metoda 3-2-1.....	28
3.4.2 Metoda RPS.....	28
3.4.3 Metoda Bestfit.....	28
3.5 Počet snímaných bodů.....	28
4 Chyby a nejistoty měření	29
4.1 Chyby měření	29
4.1.1 Hrubé chyby.....	29
4.1.2 Systematické chyby	30
4.1.3 Náhodné chyby	30
4.2 Nejistoty měření	31
4.3 Zdroje nejistot měření	32
4.3.1 Operátor	33
4.3.2 Metoda měření	33
4.3.3 Vyhodnocovací metoda	34
4.3.3 Prostředí.....	34
4.3.4 Měřená součást	35
4.3.5 Měřící sonda	36
5 Modely pro testovací měření.....	37
5.1 Kvádr.....	37
5.2 Válec.....	38
5.3 Kruh.....	38
6 Zdroje nejistot v praktickém prostředí	39
6.1 Teplota.....	39
6.2 Vibrace	39
6.3 Chyba stroje.....	39
6.4 Neúplnost kalibrací.....	40

6.5 Obsluha	40
7 Postupy měření	40
7.1 Kalibrace dotyku	40
7.2 Manuální měření	41
7.2.1 Manuální ovládání	42
7.2.2 Postup manuálního měření	44
7.3 Poloautomatické měření	46
7.3.1 Postup poloautomatického měření	46
7.4 Automatické měření	48
7.4.1 Postup tvoření programu	49
8 Naměřené hodnoty	50
8.1 Výchozí hodnoty	50
8.1.1 Kvádr	50
8.1.2 Válec	51
8.1.3 Kruh	52
8.2 Konečné hodnoty	53
8.2.1 Kvádr	53
8.2.2 Válec	54
8.2.3 Kruh	54
9 Závěr	55
10 Seznam obrázků	57
11 Seznam tabulek	58
12 Seznam příloh	59
Seznam použité literatury	59

Úvod

Se zvyšujícími se funkčními nároky na výrobky a nároky na ekonomiku provozu se stále více projevuje nutnost přesného měření. Postupně dochází k nahrazování starších metod měření, jako jsou posuvky, mikrometry, dílenské mikroskopy atd., souřadnicovými měřicími stroji (CMM). Předností CMM je rychlost a přesnost měření. V kombinaci s moderními CNC obráběcími stroji, kde může být měřicí sonda přímo součástí výrobního procesu, jde tedy o zrychlení a zpřesnění rozměrové kontroly výrobku a tedy i k zefektivnění celé výroby. Nicméně s opotřebením měřících komponentů a zastaráváním stroje se zvyšují i nejistoty měření.

Cílem této bakalářské práce je zjištění možností zlepšení přesnosti CMM. V teoretické části se budu zabývat vysvětlením a pochopením principu činnosti souřadnicového měřicího stroje a možnostmi jeho operačního systému a jejich nejistot měření vyplývajících z principiálních omezení stroje a programu. V praktické části se budu zabývat analýzou nejistot měření v praktických podmínkách a možnostmi jejich minimalizace. Také zde budou navržena modelová měření pro vyzkoušení metod minimalizace nejistot měření.

1 Konstrukce CMM

1.1 Historie

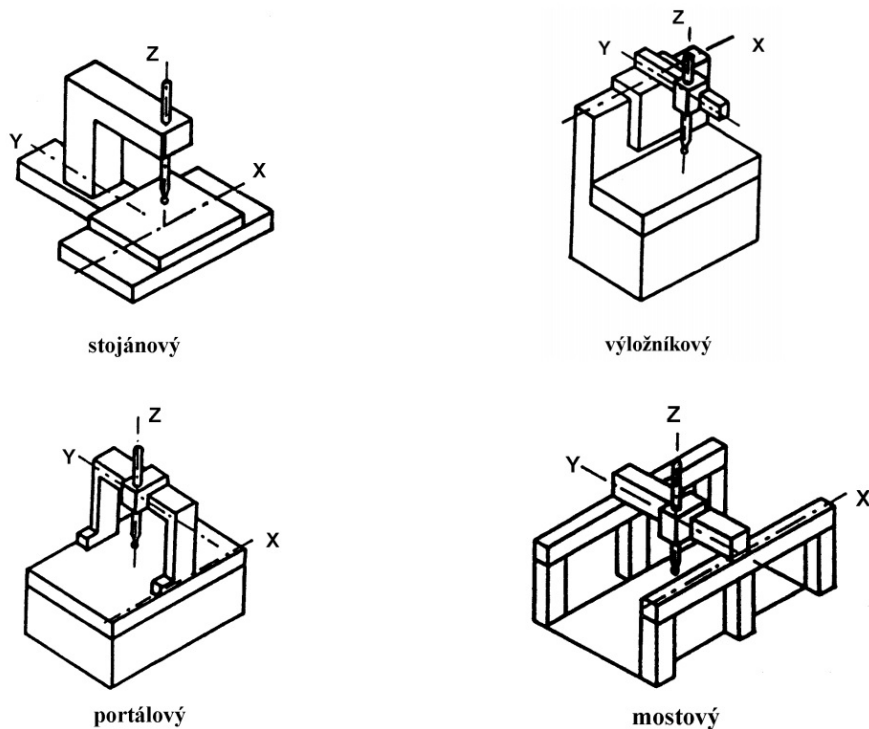
Historie souřadnicových měřicích strojů se začala psát v šedesátých letech minulého století, kdy firma Digital Electronic Automation (DEA) představila svůj první portálový CMM stroj s pevnou sondou. Přibližně ve stejné době představila také firma Ferranti Metrology svůj úhlový CMM s pevnými sondami. Nicméně myšlenka a potřeba přesného měření sahá až do dvacátých let minulého století a to kvůli rozvoji automobilového a leteckého průmyslu.

Ačkoliv byly CMM původně konstruovány jako laboratorní zařízení, velmi brzy se staly součástí kontroly výrobních procesů. CMM tímto způsobem připravili podmínky také pro další odvětví průmyslu jako je například reverzní inženýrství, kde lze tímto způsobem velmi přesně změřit rozměry daného výrobku, ke kterému nemáme výrobní dokumentaci.

1.2 Uspořádání CMM

1.2.1 Kartézsky uspořádaný CMM

CMM se vyrábí v mnoha různých podobách a specifikacích, ale základní konstrukce lze rozdělit do čtyř základních typů (Obrázek 1).



Obrázek 1 - kartézsky uspořádané CMM. Převzato a upraveno z [1]

Stojanový typ - pro zaručení tuhosti konstrukce je nutné tento typ vyrábět jen v omezených rozměrech. Proto se používá především v metrologických laboratořích pro měření malých výrobků

Výložníkový typ - u tohoto typu bývá osa Y velmi krátká (kvůli dostatečné tuhosti). Proto je vhodný k měření především dlouhých dílů

Portálový typ - se vyznačuje vysokou tuhostí konstrukce a vysokou přesností. Nejčastější je varianta s pohyblivým portálem na pevném stole. Pro zvýšení tuhosti konstrukce lze tento typ vyrobit s pevným portálem a pohyblivým stolem. Přístup k měřenému dílu je ale v každém případě omezen konstrukcí.

Mostový typ - je používán především pro rozměrné díly, jelikož tento typ konstrukce lze postavit s velkým měřicím prostorem. Tuhost celé konstrukce je zajištěna masivními sloupy a nosníky. Kvůli celkovým rozměrům konstrukce je ale snížena přesnost.

1.2.2 Nekartézsky uspořádaný CMM

Kromě výše popsaných kartézsky uspořádaných CMM, které měří v kartézských osách X, Y a Z lze také použít nekartézsky uspořádané CMM, které pracují v cylindrických, sférických nebo jiných souřadnicích. K realizaci měření v takovýchto souřadnicích se používá několik metod jako například odměřování úhlů v kloubech ramena nebo měření vzdálenosti z předem známých referenčních bodů.

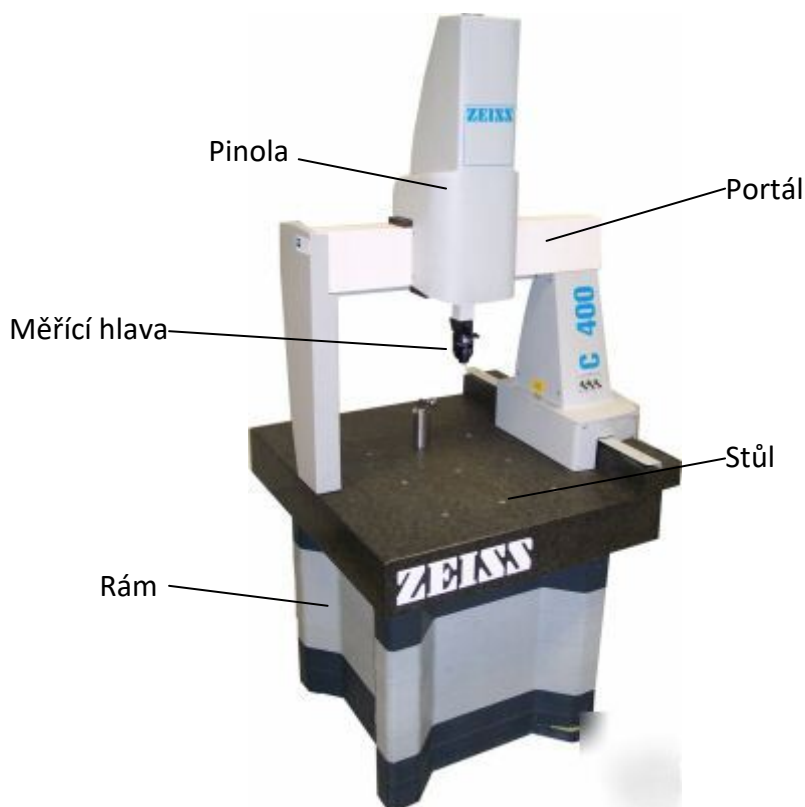
Měřící rameno – jeho hlavní výhodou je mobilita celého zařízení při zachování dostatečné přesnosti, protože ramena bývají vyrobena z lehkých slitin či kompozitů při zachování dostatečné tuhosti. Zařízení pracuje ve sférických souřadnicích, kdy s nataženým ramenem můžeme opsat polokouli. Samotné měření je realizováno odměřováním úhlů jednotlivých kloubů, mezi kterými jsou ramena o známé délce. Tímto způsobem jsme schopni určit přesnou polohu snímací sondy umístěné na konci takto uspořádaného ramene.

Ruční CMM - u tohoto neprogramovatelného CMM operátor přesouvá k vytvoření dotyku rameno s měřicí sondou ručně. Nejčastější provedení tohoto typu CMM se skládá z na výšku uloženého sloupu, po kterém se měřící rameno se sondou může pohybovat po ose X a otáčet v souřadnicích ϕ .

1.3 Části CMM

1.3.1 Základní části CMM

Mezi základní části CMM patří: rám, stůl, pinola, stojan/portál/most (podle konkrétního typu CMM)



Obrázek 2 - Zeiss C 400. Převzato a upraveno z [13]

Rám – je základ CMM, na který je připevněno všechno ostatní. U mostových CMM, kde by vlastní svařenec rámu byl nepřiměřeně velký, bývá nahrazen základovou deskou ukotvenou do podlahy. Rám musí být velmi tuhý, aby nedocházelo k prohýbání konstrukce a tím i ke znehodnocování výsledků.

Stůl – tvoří základní stavební jednotku měřicí soustavy CMM. Nejčastěji bývá vyroben z granitu, který zaručuje tvarovou a teplotní stálost stolu, aby nedocházelo ke znehodnocování výsledků měření. Ze stejného důvodu je pracovní plocha leštěná s předem připravenými místy pro uchycení výrobku.

Portál/mostní konstrukce – nejčastěji svařenec, u kterého je kladen důraz na tuhost, rozměrovou a tvarovou stálost

Pinola – v případě horizontálního provedení pinoly je důležité správně ji nadimenzovat, aby nedocházelo k jejímu prohýbání ať už vlastní vahou nebo vahou měřicí hlavy, která je umístěna na jejím volném konci. Obecně bývá pinola vyrobena z oceli ať už kruhového nebo čtvercového průřezu.

1.3.2 Vedení pohyblivých částí

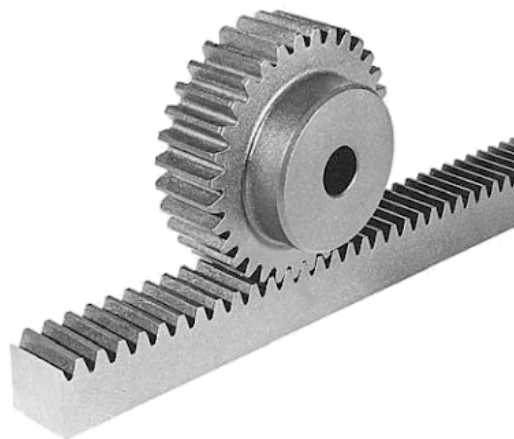
Celá konstrukce CMM musí být uzpůsobena k lehkým a plynulým posuvům pohyblivých částí i při malých rychlostech. Nejčastějším typem provedení jsou aerostatická ložiska, která mají téměř nulové tření a umožňují tak plynulý pohyb. Na rozdíl od kluzných vedení, která musí být velmi dobře promazávána, není problém s netěsnostmi a úniky oleje. Nevýhodou aerostatických ložisek je nižší odolnost proti korozi a nebezpečí poškození kluzných ploch při porušení vzduchového polštáře.

1.3.3 Pohon

Pohon CMM má za úkol co nejpřesněji posunout sondu do požadované pozice v co nejkratším čase. Zároveň se musí jednat o co nejplynulejší pohyb, protože vibrace by mohly znehodnotit výsledky měření a zároveň by radikálně snižovaly životnost celého stroje.

Ozubené převody

Jedná se o nejjednodušší pohon, který dokáže vyvolat pouze přímočarý pohyb. Tento způsob pohonu pohyblivých součástí se používá u konstrukcí, které vyžadují dlouhé přímočaré posuvy jako například u mostového typu CMM.



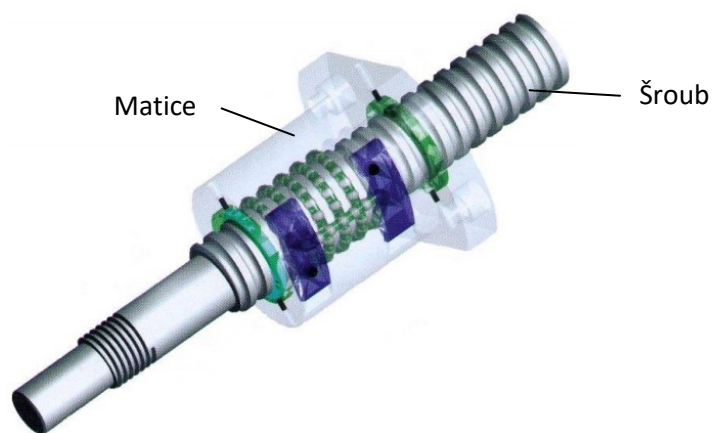
Obrázek 3 - ozubený převod. Převzato a upraveno z [14]

Kluzné převody

Další variantou jsou kluzné převody. Tento druh pohonu také dokáže vyvolat pouze přímočarý pohyb, stejně jako ozubený převod. Důvod jejich použití může být například snaha o maximální bezpečnost stroje. Při správném seřízení přitlačné síly není nutné sledovat odpor kladený pohyblivými částmi portálu, neboť při zvýšení odporu vůči pohybu nad bezpečnou úroveň, dojde k proklouznutí převodu a nedojde tak k poškození stroje. Kvůli možnosti prokluzu pohonu je ale nutné odměřovat vzdálenost jiným způsobem, než je rotační enkodér na pohonném elektromotoru, protože po každém prokluzu by bylo nutné znovu nastavit výchozí bod měřícího stroje.

Vodící šrouby

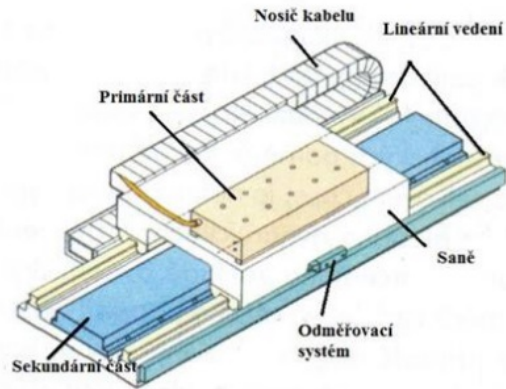
Tento druh pohonu je realizován otáčením šroubu, který po závitě posouvá matici, ať už se jedná o obyčejný metrický závit či kuličkový šroub. Častěji se používá kuličkový šroub, neboť se jedná o přesnější a plynulejší pohyb s výrazně nižším třením.



Obrázek 4 - vodící šroub. Převzato a upraveno z [15]

Lineární elektromotor

Největší výhodou tohoto druhu pohonu je prakticky nulové tření samotného pohonu, jelikož se jednotlivé, vůči sobě pohybující se části elektromotoru nedotýkají. Zrychlení tohoto druhu pohonu jsou značná díky absenci jakékoliv převodovky, která by redukovala rychlost pohybu. Z tohoto důvodu se také jedná o nejpřesnější pohon, jelikož zde neexistují vůle v převodovce, které by bylo nutné vymezovat.



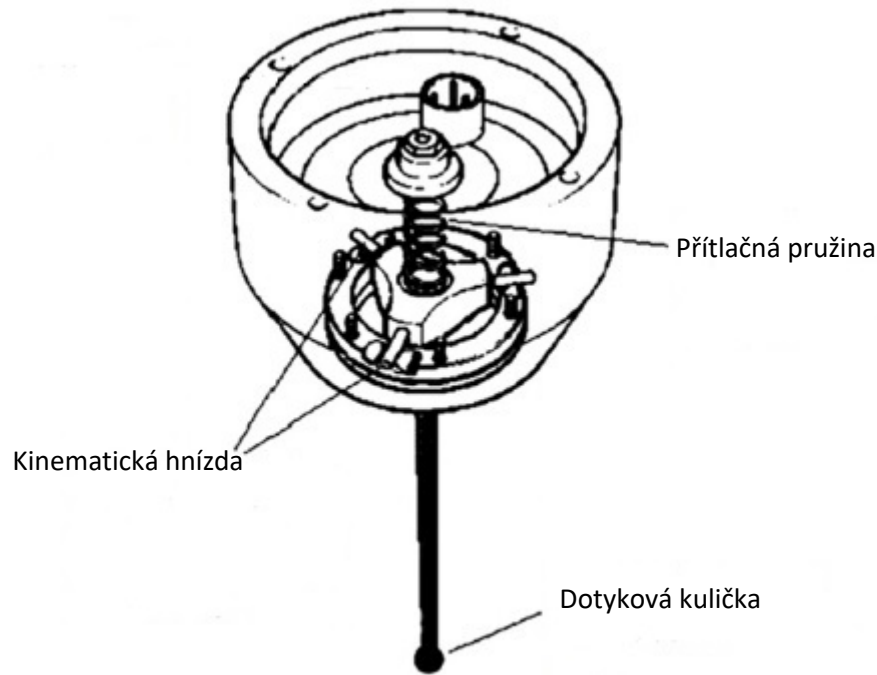
Obrázek 5 - lineární elektromotor. Převzato a upraveno z [12]

1.4 Měřicí sonda

V současné době jsou používány dva hlavní typy měřících sond a to dotykové a bezdotykové. Jak dotykové tak bezdotykové sondy se dále dělí na několik typů, jako například kinematické, tenzometrické, laserové, kamerové a další. Bezdotykové měřicí sondy se u CMM příliš často nepoužívají. Daleko častěji bývají součástí automatických dílenských mikroskopů, které pracují pouze v dvourozměrné rovině.

1.4.1 Kinematická sonda

Základem kinematické sondy jsou tři kinematická hnízda tvořená válečkem nebo kuličkou či jejich kombinací a odpovídající drážkou, do které kuličky či válečky zapadají, čímž jsou zaručeny přesně dva stykové body pro každé kinematické hnízdo. Do klidové pozice jsou kinematická hnízda tlačena pružinou, která zaručuje navrácení kinematických hnízd do klidové pozice poté, co pomínou silové účinky, které zapříčinily jejich vychýlení.



Obrázek 6 - kinematická sonda. Převzato a upraveno z [9]

Součásti kinematických hnízd jsou často vyrobeny z karbidu wolframu, jelikož je tento materiál odolný proti tvarovým změnám způsobených opotřebením a zaručuje tak přesnou opakovatelnost měření.

Další součástí sondy je ocelový dřík, který spojuje dotykovou kuličku a kinematická hnízda. Vzhledem ke konstrukci sondy je dřík také důležitým faktorem pro přesnost měření, neboť kvůli jeho elasticitě může dojít ke zkreslení naměřených hodnot. Toto zkreslení závisí především na tuhosti a délce dříku a na síle přítlačné pružiny.

1.4.1.1 TP20





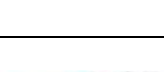
Kinematická sonda TP20, která je použita na stroji v podniku MOTOR Jikov, je kompaktní sonda s pětisměrovým nebo šestisměrovým snímáním. Sonda se skládá ze dvou částí a to ze samostatného tělesa sondy a z modulově měnitelných dotyků. Tyto dotyky jsou k tělesu sondy připojeny magneticky s vysokou opakovatelností připojení. Díky tomu není nutné po výměně dotyku kalibrovat celou sondu.

Samotné moduly dotyků lze přestavovat dle potřeby, neboť díky závitům M2 jsou kompatibilní s širokou škálou nástavců a druhů dotyků. Moduly jako takové lze poté dělit do

několika kategorií podle síly potřebné k sepnutí. Moduly jsou barevně označené, aby nedocházelo k záměnám.

Tabulka modulů

Tabulka 1 - měřicí moduly. Převzato a upraveno z [8]

Modul	Barva	Spínací síly*	Použití
SF – Standartní síla		X, Y: 0,08 N Z: 0,75 N	Vhodný pro většinu měření
LF – Nízká síla		X, Y: 0,055 N Z: 0,65 N	Pro měření měkkých materiálů
MF – Střední síla		X, Y: 0,1 N Z: 1,9 N	Pro měření vyžadující vyšší spínací sílu
EF – Zvětšená síla		X, Y: 0,1 N Z: 3.2 N	Pro dlouhé a těžké konfigurace doteků nebo pro měření kde vibrace způsobují chybná sepnutí
6W – Šestisměrový		X, Y: 0,14 N Z: 1,6 N	Pro měření ve směru -Z

*)Uvedená síla je ve směru nízké síly při použití dotyku o délce 10mm

Zásobníky modulů

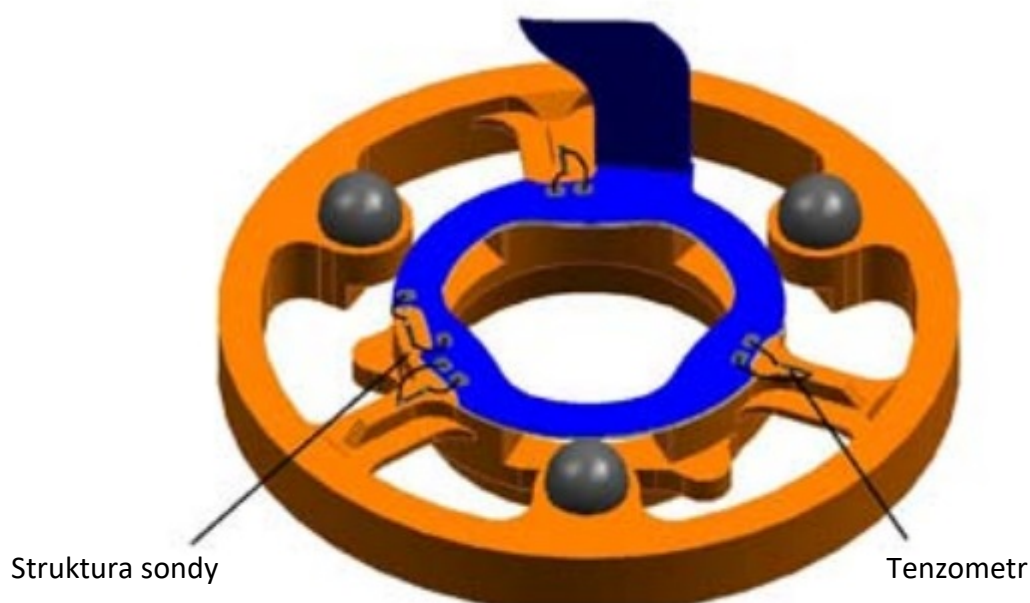
Uvedené moduly dotyků mohou být také použiti v kombinaci se zásobníky modulů. Tyto moduly mohou sloužit k automatické výměně modulu dotyku. V tomto případě je zásobník připevněn na definované místo na pracovním stole stroje. Moduly jsou v takovém případě uloženy na očíslovaných přihrádkách. Při požadavku na výměnu modulu stroj automaticky odloží do té doby používaný modul do určené prázdné přihrádky a z určené přihrádky vyzvedne nový modul. Další možností je zásobník, který slouží pouze k odkládání a vyzvedávání modulů obsluhou. Tyto zásobníky jsou používány především z důvodu předcházení poškození modulu.



Obrázek 7 - zásobník modulů. Převzato a upraveno z [8]

1.4.2 Tenzometrická sonda

Tento přesnější typ sondy vznikl nahrazením kinematických hnízd citlivými tenzometry na pevně uložených ramenech. Tyto tenzometry měří změnu povrchového napětí na ramenech změnou elektrického odporu vodičů v nich uložených. Při dotyku dojde k deformaci ramen, na kterých jsou tenzometry umístěny, což zaznamenají zmíněné tenzometry a řídicí elektronika vyhodnotí změnu elektrického odporu jako dotyk.



Obrázek 8 - tenzometrická sonda. Převzato a upraveno z [9]

Součástí tenzometrické sondy také často bývají tenzometrická hnízda jako u kinematické sondy, ale zde mají především bezpečnostní charakter, jelikož při kolizi s měřeným výrobkem by se ramena tenzometrické sondy mohla poškodit.

Tato konstrukce sondy zajišťuje minimalizaci odchylky přejezdu pozice, jelikož pro vyhodnocení dotyku je zapotřebí menší síla než u kinematické sondy a nedochází tedy k tak velkým ohybům dříku. Kvůli této citlivosti má tento druh sondy tendenci k náhodným sepnutím například při rozjezdech hlavy kvůli přejezdu do nové pozice. Tento problém je většinou řešen elektronickým obvodem, který vyhodnocuje čas trvání hlášeného dotyku a podle toho určuje, zda se jedná o opravdový dotyk nebo například pouze o vibrace stroje.

1.4.3 Skenovací doteková sonda

Tato sonda se používá především v případech, kdy potřebujeme určit velké množství bodů. Typickým příkladem takovéto potřeby jsou například plochy na letecké vrtuli či lodním šroubu. S touto sondou sice nedosahujeme takových přesností, neboť měření probíhá za stálého dotyku kuličky a měřené plochy a je vyhodnocována konstantnost síly působící na měřicí kuličku sondy. Z tohoto důvodu je nutné použít hlavu s řízenými pohyby nastavení sondy.

1.4.4 Doteky

Za doteky považujeme ty části přístroje, které přicházejí do kontaktu s měřeným výrobkem a předává tak informaci do hlavy měřicí sondy. Existuje několik základních druhů doteků, ale u všech je nejdůležitější co nejmenší elastická deformace materiálu, ze kterého je vyroben, co nejmenší odchylky tvaru a co největší odolnost proti mechanickému opotřebení. Z tohoto důvodu bývají doteky vyrobené z rubínu, nitridu křemíku nebo oxidu zirkoničitého.

Přímý dotek – tento konstrukčně jednoduchý dotek sestává z dříku a kuličky na jeho konci. Používá se pro většinu běžných měření. Délka dříku a velikost kuličky musí být volena s ohledem na celkové rozměry součásti, kterou chceme měřit, stejně jako materiály ze kterých má být dotek vyroben.

Hvězdicový dotek – sestává z několika (až pěti) dříků s kuličkami, které jsou uspořádány do tvaru hvězdy. Díky tomuto uspořádání je možné měřit složitější tvary či díry, a to i v záporném směru os, mnohem rychleji, protože není nutné tolikrát přejíždět do nových pozic.

Diskový dotek – nejčastěji jsou tímto dotykem snímány různé zápichy a drážky například v dírách, kde není možné použít hvězdicový dotek. Tento druh doteku s jednoduchým diskem může měřit pouze ve dvou osách, ale lze ho zkombinovat s přímým dotykem pro získání možnosti měření ve třech osách.

Válcový dotek – konstrukčně podobný přímému dotyku, ale místo dotekové kuličky je na konci dráku umístěn válec. Tento typ se používá pro měření lisovaných výrobků nebo tenkých plechů, kde není možno zaručit dokonalý kontakt s měřeným výrobkem

Dotek s hrotem – hlavní oblastí použití tohoto doteku je měření jemných závitů, rysek a velmi malých děr. Neměl by být používán k běžnému měření.

1.5 Odměřovací systém CMM

Neméně důležitou součástí CMM je odměřování polohy jednotlivých pohyblivých částí stroje. Jednotlivé způsoby odměřování se mohou velmi lišit, ale všechny mají za úkol přesně odměřit vzdálenost, o kterou se posunula daná pohyblivá část stroje od výchozího známého bodu, ke kterému celé měření vztahujeme. Přesnost celého stroje je tedy přímo závislá na přesnosti použitého odměřovacího systému. Chyba měřítka se projevuje jako periodická chyba a závisí také na odměřované vzdálenosti.

Odměřovací systémy lze rozdělit na inkrementální, absolutní a kombinované, podle toho jakým způsobem předávají informaci o změně polohy. Inkrementální systémy pouze udávají informaci, kolik posunů o nejmenší jimi měřitelnou vzdálenost proběhlo za dobu pohybu. Z tohoto důvodu je nutné u těchto systémů určit výchozí bod, od kterého bude měření probíhat. Protože pokud bychom tento výchozí bod neurčili, dostávali bychom pouze informace o vzdálenosti, kterou zařízení urazilo, ale už bychom netušili, kde v prostoru se nachází koncový bod trasy.

Absolutní systémy vždy udávají jednoznačnou informaci o své poloze, protože každá pozice, do které se zařízení dostane, má jednoznačné určení. Nevýhodou je, že bývá složité, nepraktické nebo neekonomické takovýto systém navrhnout. Mnohem častější bývá kombinace těchto systémů, kdy například u rotačních enkodérů bývá absolutní odměřování možné v rámci jedné otáčky s využitím Grayova plazivého kódu. Pokud se ale enkodér otočí o více než maximálně jednu otáčku, musí elektronický řídicí systém počítat pouze počet otáček a připočítat k tomuto číslu absolutní odměření nedokončené poslední otáčky.

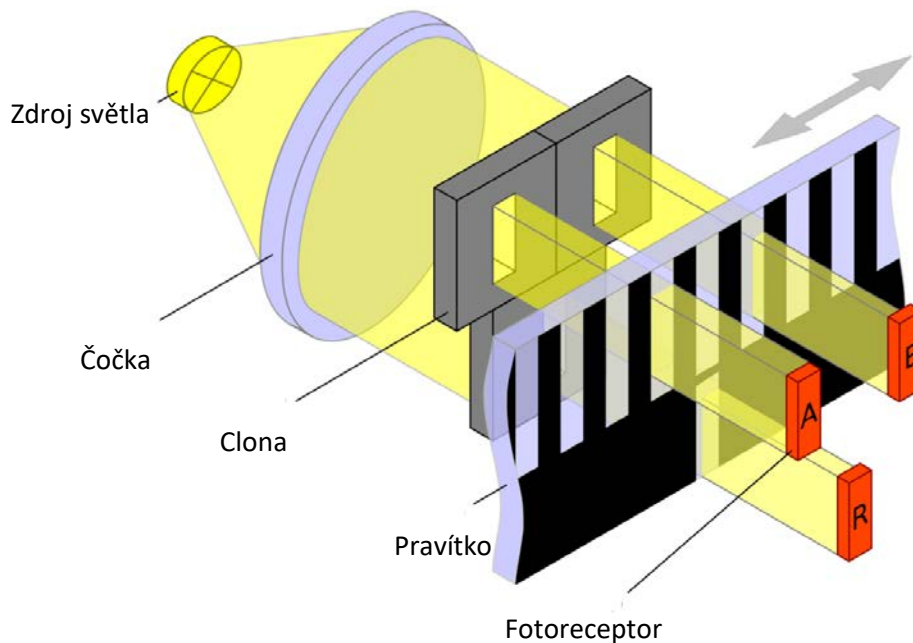
Neméně důležitým hlediskem rozdělení odměřovacích systémů, je fyzikální způsob získávání informací o změně pozice. Jedná se především o optické, indukční, rotační a magnetické systémy

1.5.1 Optické systémy

Optické odměřovací systémy existují v mnoha variantách a provedeních, ale vždy musí obsahovat opticko-elektrickou čtecí hlavu a měřítko, jedno z nich musí být připevněno na pohyblivou část stroje a druhé na nepohyblivou část

1.5.1.1 Prosvětlovací měřítko

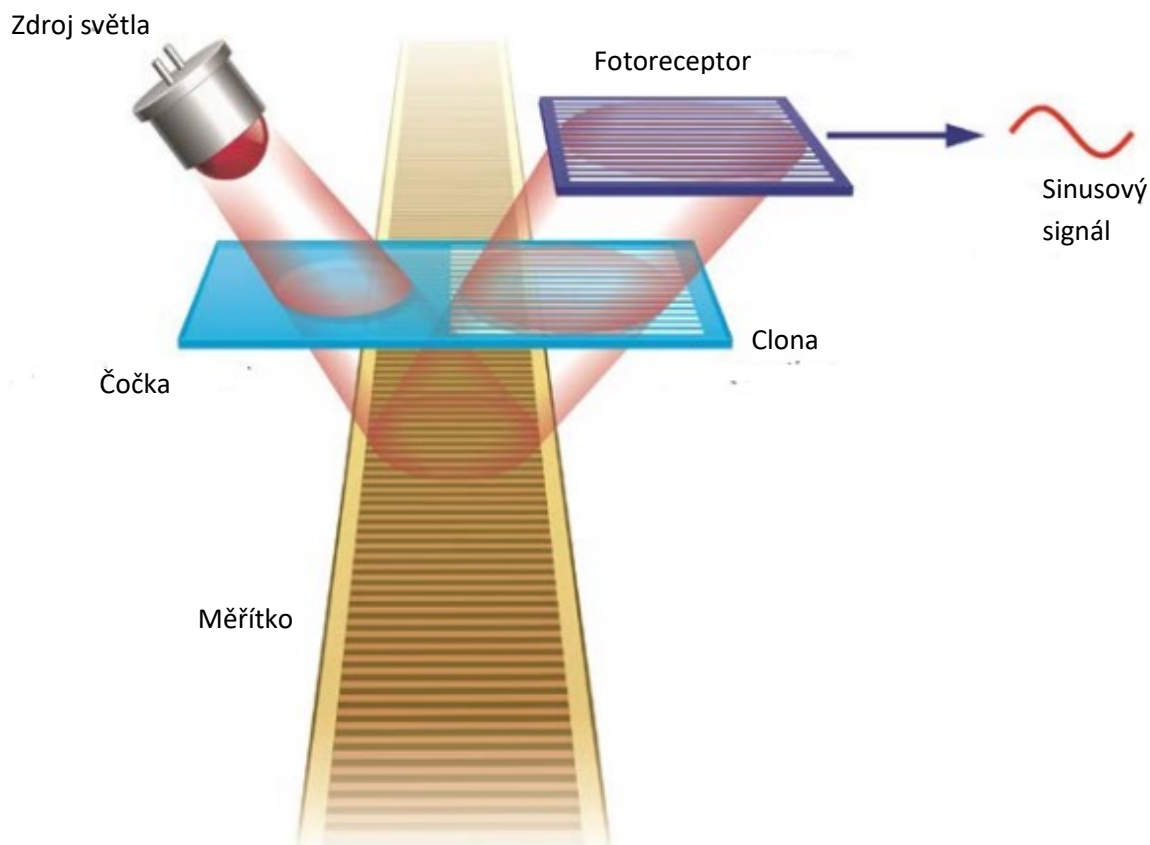
Princip fungování tohoto odměřovacího systému je založen na skleněném pravítku s čarami vytvořených nanesením nejčastěji chromové vrstvy přes mřížku, které je prosvěcováno. Přesnost měření přímo závisí na hustotě dělení pravítka svislými čarami, které je obvykle 50 až 100 čar na milimetr. Zdroj světla také obsahuje čočku pro koncentraci světla a clonu, která zabraňuje světlu osvětlit jiná místa, než ta kde jsou na druhé straně pravítka fotoreceptory, které poskytují informaci, zda jsou osvětleny nebo ne. Tento zaznamenaný stín je vyhodnocován elektronikou a jsme z něj schopni určit nejen rychlost pohybu, ale také jeho směr.



Obrázek 9 - prosvětlovací měřítko. Převzato a upraveno z [16]

1.5.1.2 Odrazové měřítko

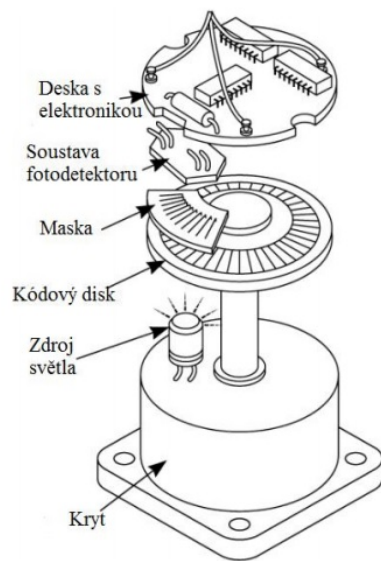
Princip fungování tohoto systému je obdobný jako u prosvětlovacího měřítka s tím rozdílem, že v tomto případě je měřítko vyrobené nejčastěji z oceli a světlo procházející skrz clonu se od něj odráží. Dále světlo pokračuje skrze průhled a dopadá na fotoreceptory. Měřítka v kombinaci s clonou vytváří na fotoreceptorech periodicky se opakující vzor, který je převáděn na sinusový signál a ten je následně vyhodnocován elektronikou.



Obrázek 10 - odrazové měřítko. Převzato a upraveno z [10]

1.5.2 Rotační enkodér

Toto zařízení se skládá ze zdroje světla, kódového disku, masky a fotodetektorů. Rotační enkodéry existují v inkrementální nebo absolutní verzi, kdy inkrementální verze pouze generuje impulzy o pohybu a je na řídicí elektronice aby je spočítala a vyhodnotila. Rozdíl mezi inkrementální a absolutní verzí je pouze v kódovém disku a masce. Absolutní verze v rámci jedné otáčky udává údaj nejen o pohybu, ale také o natočení v rámci jedné otáčky měřeno od kontrolní značky na kódovém disku a to díky tomu, že na kontrolním disku je možné jednoznačně určit polohu.

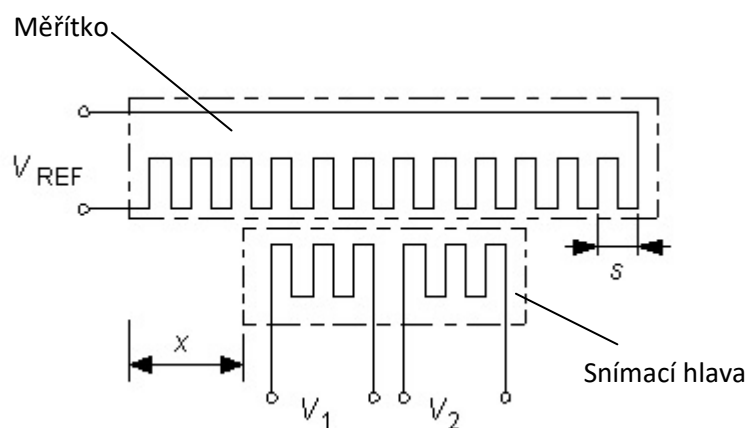


Obrázek 11 - rotační enkodér. Převzato a upraveno z [17]

Kódový disk může být vyroben z průhledného materiálu, jehož části jsou zneprůhledněny, například další nanesenou vrstvou materiálu nebo naopak z neprůhledného materiálu, například z oceli, s dírami. Ocelový typ kódového disku není moc používán, jelikož je jednodušší nanést chromovou vrstvu na skleněný disk. Jak je vidět na obrázku, pouze kódový disk je připojený na hřídel a jako jediný se tak s hřídelí otáčí. Kódový disk je prosvěcován zdrojem světla a soustava fotodetektorů poté vyhodnocuje, jaký stín byl kódovým diskem vržen skrz masku, díky čemuž získáváme informaci o pohybu a také o jeho směru.

1.5.3 Induktosynové systémy

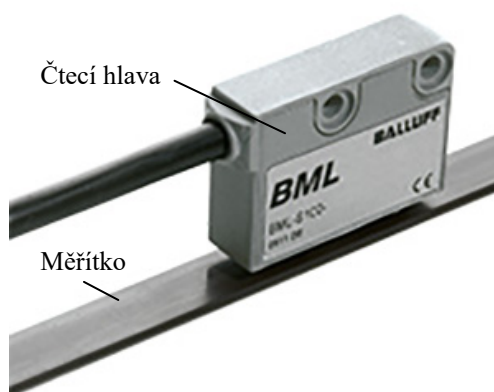
Ať už se jedná o rotační nebo lineární provedení, vždy se skládá z nevodivého měřítka a snímací hlavy. Na měřítku je umístěn vodivý materiál, který se v pravidelných intervalech meandrovitě vine po celé délce měřítka a nad tímto vinutím se posouvá snímací hlava, ve které jsou umístěny dvě vůči sobě posunutá vinutí. Vinutí na měřítku je napájeno střídavým napětím a díky tomu se ve vinutích snímací hlavy indukuje napětí. Na jednom vinutí se indukuje napětí podle sinusové závislosti a na druhém podle kosinusové. Tyto dva signály jsou po zesílení vzájemně porovnávány a podle tohoto porovnání se poté vyhodnocuje poloha, respektive posunutí, snímací hlavy oproti měřítku. Tento systém má dobrou rozlišitelnost, ale je nutné jak k měřítku, tak ke čtecí hlavě přivést kabel.



Obrázek 12 - indukční systém. Převzato a upraveno z [18]

1.5.4 Magnetické systémy

Tento inkrementální systém se zakládá na pásku, kde jsou uloženy střídavě napólované magnety, nad kterými přejíždí jezdec se dvěma Hallovými sondami. Při přejezdu jezdc nad magnetickým páskem se v navzájem posunutých Hallových sondách generuje napětí, které je vyhodnocováno. Díky malým rozměrům magnetů v pásku a Hallových sond v jezdcí je možno dosáhnout velkého rozlišení, ale není možné dosahovat velkých rychlostí posuvu. Hlavní výhodou tohoto systému je odolnost proti prachu, olejům a dalším nečistotám, protože jezdec je uzavřen v odolném pouzdru.



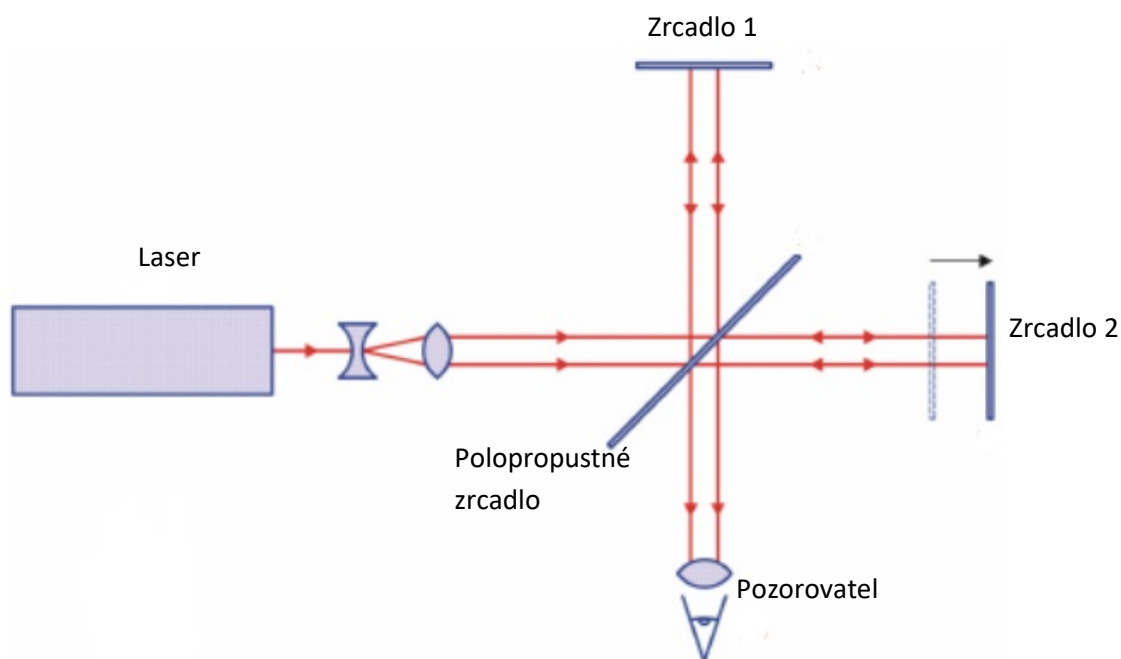
Obrázek 13 - magnetický systém. Převzato a upraveno z [19]

1.5.5 Interferometry

Základem této metody je rozdělení monochromatického paprsku (laseru) polopropustným zrcadlem na dvě větve. Referenční větev paprsku se odrazí od pevného zrcadla v pevně dané vzdálenosti. Měřicí větev se odrazí od pohyblivého zrcadla. Obě větve jsou poté snímány interferometrem a jsou na stínítku zjišťovány interference mezi fázemi

jednotlivých větví. Pokud známe vlnovou délku monochromatického paprsku je možné tímto způsobem zjistit, o kolik byla dráha měřící větve paprsku delší nebo kratší oproti přesně známé délce dráhy referenční větve paprsku. Jedná se o nejpřesnější, ale zároveň také o nejdražší měřící metodu, která je také velmi citlivá na okolní podmínky.

Nejčastějším použitím laserového interferometru je kontrola a kalibrace jiných metod odměřování používaných na CMM.



Obrázek 14 – interferometr. Převzato a upraveno z [4]

V této kapitole bylo čerpáno ze zdrojů: [1],[3] a [4].

2 Software

Nedílnou součástí CMM je software, který ovládá pohony a vyhodnocuje signály získané z odměřovacích systémů a snímací hlavy. Díky tomuto blízkému propojení je možné softwarem kompenzovat některé druhy nejistot měření. Zde lze nastavit například nižší přibližovací rychlost sondy k měřené součásti, aby nedocházelo k chybě přejezdu. Řídící software také do jisté míry přesnosti počítá s teplotní roztažností materiálu konstrukce souřadnicového měřicího stroje.

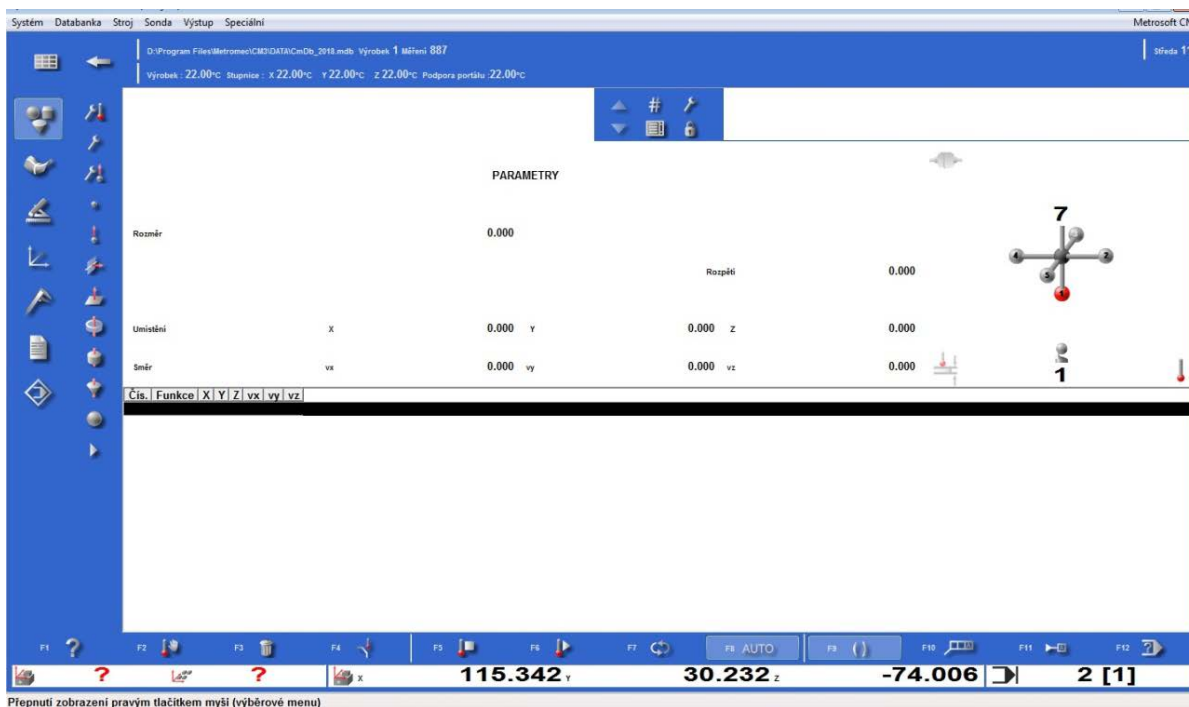
V moderním softwaru je možné jednoduše vytvářet měřicí programy pomocí objektově orientovaného programování a to vkládáním jednotlivých elementů měření, které mohou obsahovat snímání jednotlivých bodů, skenování či optické měření.

Je také možné provádět měření bez měřicího programu a to manuálním ovládáním nebo v CNC režimu. Program pro CNC režim se programuje přímo na stroji bez nutnosti jeho připojení k dalším zařízením.

Velkou výhodou moderních softwarů je rychlé a přesné porovnání odchylek rozměrů měřené součásti od CAD modelu, podle kterého byla dříve vyrobena. Také umožňují vytvoření nového CAD modelu u součásti, kde nemáme k dispozici výkresovou dokumentaci, např. při reverzním inženýrství.

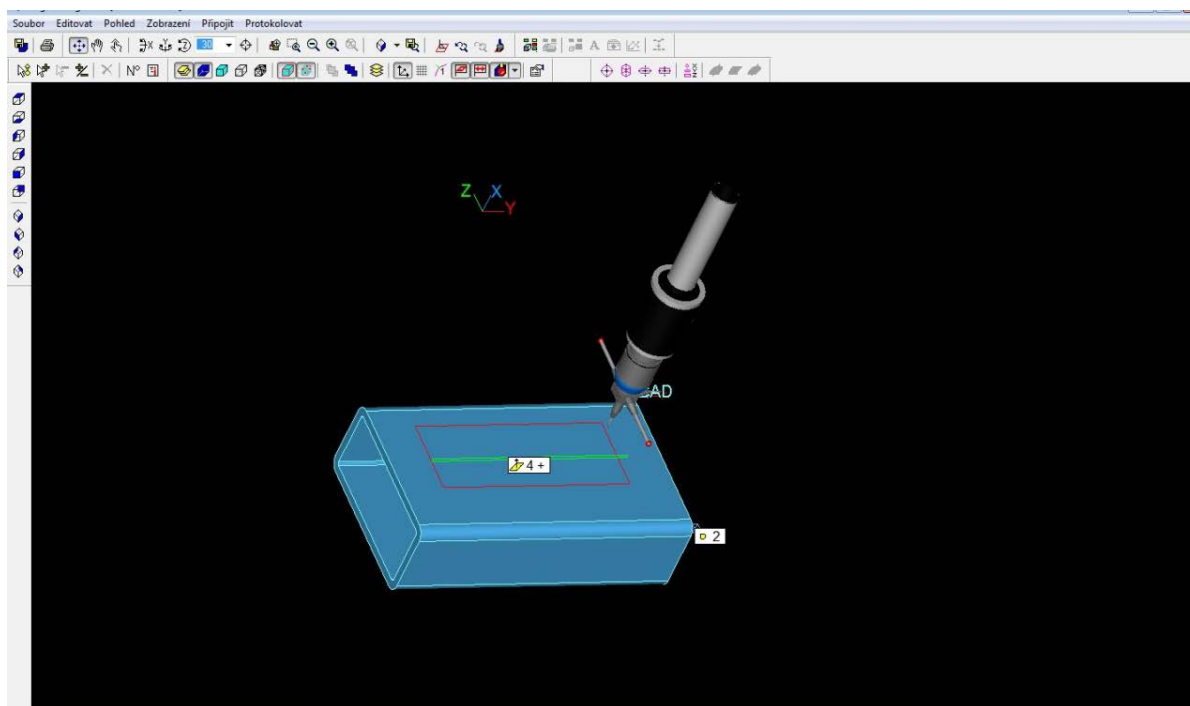
Řídící software Metrosoft CM 3.60 SP3, který je nainstalován na řídicím počítači souřadnicového měřicího stroje, umožňuje měření rovin, válců, kruhů, úhlů, rovnoběžností, kolmostí, házení a mnoho dalšího. Vybrané naměřené hodnoty lze poté uspořádat do přehledného protokolu o měření.

Tento software je velmi intuitivní, co se týče ovládání. A to především díky grafickému rozhraní, kde si v podstatě pouze vybereme, jaký geometrický prvek chceme měřit.



Obrázek 15 - výchozí obrazovka. Zdroj: [autor]

Další předností softwaru je regulační grafika. Pokud jsme si určili počátek souřadného systému správně, a pokud máme správně naorientovaný a nahraný CAD model, můžeme zde vidět, kde se nachází měřící sonda vůči měřené součásti. Díky této grafice také můžeme jednoduše vybírat body pro měření.



Obrázek 16 - regulační grafika. Zdroj: [autor]

3 Princip souřadnicového měření

Účelem CMM je změření aktuálních rozměrů měřené součásti. Pro jednoduchost lze říci, že snímací hlava určí, zda se dotkla měřené součásti nebo ne, odměřovací systém nahlásí vzdálenosti od referenčního bodu a software poté z těchto informací sestaví model součásti. Tento analytický model poté obsahuje všechny zjištěné či dopočítané informace o měřené součásti (tvar, rozměry, úhly atd.).

Veškeré měření ale začíná u analýzy výkresové dokumentace. Zde si musíme říct, které rozměry jsou důležité, a budeme je měřit, a jak součást upneme ke stolu CMM, abychom měli volný přístup k požadovaným bodům měření. Také je důležité vybrat vhodný typ snímací hlavy pro dané měření a provést kalibraci CMM, která má vliv na přesnost následujícího měření.

3.1 Analýza výkresové dokumentace

Z výkresové dokumentace je nejdůležitější vyčíst geometrické tolerance a na kterých plochách či křivkách je nutné je měřit. Dále si také rozmyslíme, jak konkrétní součást upneme. Při výběru je nutné zvážit, jaká bude výsledná tuhost upnutí a jaký bude přístup k měřeným charakteristikám.

3.2 Upnutí

Po analýze výkresové dokumentace a rozhodnutí v jaké poloze bude měřená součást, musíme rozhodnout, zda použijeme stavebnicové upínání nebo zda vyrobíme jednoúčelové upínání přímo pro danou součást. Toto rozhodnutí učiníme na základě sériovosti výroby měřené součásti. Pro kusovou či malosériovou výrobu je vhodné použít stavebnicové upínání, jelikož jednoúčelové upínky mohou být nákladné na výrobu nebo by jejich výroba trvala nepřiměřeně dlouhou dobu.

Oproti stavebnicovým upínkám, mají jednoúčelové upínky výhodu v rychlosti výměny měřené součásti za nový kus stejného druhu. Jelikož však nedochází k rozsáhlejší manipulaci s upínacím systémem, hrozí zanesení upínacích ploch nečistotami, které by mohly ovlivnit přesnost měření. Proto je nutné udržovat čistotu pracovního prostoru.

Ať už se však rozhodneme pro kteroukoliv variantu upínek, připevníme je ke stolu CMM, ve kterém jsou díry se závity.

3.3 Kalibrace

Kalibrace systému měření probíhá na kalibrační kouli o známém průměru, která je pevně spojena se stolem, a to pomocí dřívku. Kalibrační koule bývá vyrobena z keramiky a to kvůli malé tepelné roztažnosti, tvrdosti a tuhosti tohoto materiálu. Průměr kalibrační koule se může lišit podle velikosti dotykové kuličky na referenčním snímači, ale nejčastěji se pohybují v rozmezí od 10 do 80 milimetrů. Prvotní kalibrace se provádí referenčním snímačem, který je viditelně označen. U tohoto snímače známe jak průměr dotykové kuličky, tak délku dřívku. Referenční snímač zjišťuje polohu a rozměry kalibrační koule a z těchto naměřených dat jsou poté vypočítávány nutné korekce měřicího systému.

Kalibraci je nutné provést pro každý použitý druh doteku, a naměřené hodnoty jsou porovnávány s měřením uskutečněným referenčním snímačem. Kalibrace probíhá podle speciálního programu, uloženém v řídicím software. Do tohoto programu se zadávají nezbytné informace pro kalibraci jako například velikost kalibrační kuličky. Běžně se

používá deset až patnáct bodů na kuličce, které jsou měřeny vícekrát a z tohoto měření je program schopen vypočítat odchylku jednotlivých měření. Z důvodu přesnosti kalibrace a následných měření je nutné velmi dobré očištění povrchu jak kalibrační kuličky, tak dotyku použitého při kalibraci.

3.4 Vyrovnání

Jedná se především o zjištění orientace souřadného systému měřené součásti vzhledem k souřadnému systému stroje. Souřadný systém výrobku určujeme podle hlavních elementů, ze kterých se skládá.

3.4.1 Metoda 3-2-1

Nejčastějším způsobem definování souřadného systému je tzv. vyrovnání 3-2-1. Při tomto způsobu vyrovnání zvolím základní rovinu, přímku a bod. Základní rovina bývá často rovina stolu. Přímku, pokud je to možné, volím jako směrový vektor výrobku. Například u válce, kuželu atd. volím jako vektor výrobku jejich osu symetrie. Bod zde reprezentuje počátek souřadného systému výrobku a je k němu vztažen.

3.4.2 Metoda RPS

Další metodou je RPS, které má dvě varianty a to RPS 321 a RPS volný tvar. Základní pravidla RPS 321 jsou stejná jako u metody 3-2-1. Hlavní rozdíl je, že při metodě RPS 321 jsou využívány elementy výrobku jako základy souřadnicového systému.

Pro měření výrobků volných tvarů lze používat metodu RPS volný tvar. U této metody naměřené body projektujeme na jmenovitou rovinu definovanou bodem a normálou. Měření probíhá ve smyčce a opakovaným měřením dochází ke zpřesňování výsledků.

3.4.3 Metoda Bestfit

Tato metoda se používá především pro měření volných tvarů. Metoda spočívá v naměření až neomezeného počtu bodů či geometrických elementů. Tyto naměřené hodnoty lze poté připasovat do jejich jmenovité geometrie. Software poté soustavu naměřených bodů a geometrických elementů posouvá a natáčí, až dosáhne minimální odchylky od skutečné geometrie výrobku.

3.5 Počet snímaných bodů

Minimální počet snímaných bodů je dán geometrickou definicí elementů měřené součásti. Již z tohoto minimálního počtu software pozná, o jaký geometrický prvek se jedná, ale pro přesné měření je třeba nasnímat vždy větší počet bodů než je minimum. Je poté na

našem uvážení o kolik bodů více zvolíme, jelikož i větší počet bodů může být pro měření kontraproduktivní.

Tabulka 2 - minimální počet bodů. Převzato a upraveno z [11]

Element	Minimální počet bodů
bod	1
přímka	2
rovina	3
bod symetrie	2
kružnice	3
válec	5
kužel	6
koule	4
torus	7
rovina symetrie	4
elipsa	5
obdélník	5

V této kapitole bylo čerpáno především z: [2],[4] a [5]

4 Chyby a nejistoty měření

4.1 Chyby měření

Chyba měření je definována jako rozdíl naměřené hodnoty a referenční hodnoty rozměru měřené součásti. V dnešní době je koncept chyby měření nahrazen vyjádřením nejistot měření, ale myslím, že je vhodné uvést zde tento koncept. Chyby měření dělíme především na chyby hrubé, systematické a nahodilé.

4.1.1 Hrubé chyby

Projevem hrubé chyby měření bývá velmi odlehlá hodnota od pozorovatelného trendu ostatních naměřených hodnot. Její příčinou může být nesprávná funkce měřidla, nesprávné odečtení údajů atd. Hrubé chyby lze omezit důsledným dodržováním měřících postupů a metodik měření.

4.1.2 Systematické chyby

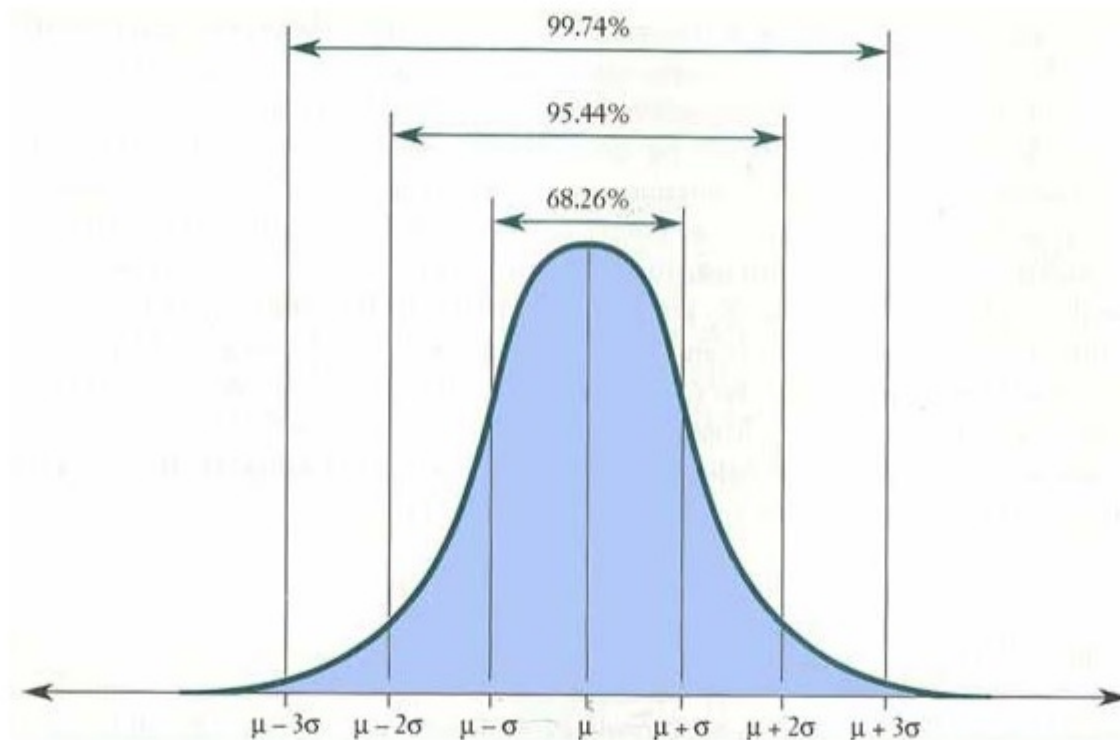
Systematické chyby ovlivňují veškerá měření, a pokud jsou okolní podmínky neměnné, jsou systematické chyby stálé. Výhodou systematických chyb je jejich relativně snadné odstranění a to provedením korekce měřidla. Ne vždy lze odstranit celou systematickou chybu měření a mnohdy po korekci zůstává její zbytek, který lze označit jako nevyhnutelnou systematickou chybu.

4.1.3 Náhodné chyby

Tyto chyby jsou nepředvídatelné a nelze je vyloučit z procesu měření. Vznikají především špatně zvolenou metodou měření, poškozením měřidla, chybou obsluhy, atd. Ovlivňují každé měření jiným způsobem, ať už jde o velikost či o znaménko. Jedinou možností jejich vyloučení jsou opakovaná měření s využitím statistických metod. Tyto metody musí odpovídat zvolenému druhu rozdělení. V praxi se nejčastěji používá Gaussovo (normální) rozdělení.

Normální rozdělení

Jedná se o nejpoužívanější rozdělení ve statistických metodách. Používá se pro statistické výpočty v případech kdy má na výsledek vliv mnoho nepatrných a navzájem nezávislých vlivů, které způsobují kolísání výsledné hodnoty.



Obrázek 17 - normální rozdělení. Převzato a upraveno z [3]

Plocha pod křivkou určuje pravděpodobnost, že se naměřené hodnoty nachází v daném intervalu.

4.2 Nejistoty měření

Tato nejistota měření určuje oblast rozsahu naměřených hodnot v pásmu okolo skutečné hodnoty. Nejistoty měření se vztahují nejen k naměřeným hodnotám jako takovým, ale také k měřicím přístrojům, hodnotám konstant použitých pro výpočet, korekcím atd. a obecně ke všem faktorům, na kterých nejistota měření závisí. Pro výpočet nejistot měření je důležitý statistický přístup, který předpokládá existenci určitého rozdělení pravděpodobnosti, které udává pravděpodobnostní pásma, ve kterých se naměřená hodnota může nacházet vzhledem ke skutečné hodnotě.

Charakterizující udávanou veličinou pro vyjádření míry nejistoty měření je směrodatná odchylka označována jako **standardní nejistota** – u . Toto číslo vyjadřuje pásmo okolo naměřené hodnoty, ve kterém se pravděpodobně nachází skutečná hodnota. Bývá udávána buď jako samostatné číslo bez znaménka nebo se zapisuje za naměřenou hodnotu se znaménkem \pm . Standardní nejistota se dále dělí na nejistoty typu A a typu B, které si přiblížíme dále.

Standardní nejistota typu A – tyto nejistoty patří především složky stanovené statistickým zpracováním naměřených hodnot, kdy každou hodnotu měříme vícekrát za stejných podmínek. Tyto složky jsou především odhady rozptylů a směrodatných odchylek, které stanovíme s opakovaných měření. Nejčastěji se nejistota typu A určí jako výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru podle vzorce:

$$u_{Ax} = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Přičemž výběrový průměr \bar{x} je dán:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Standardní nejistota typu B – sem spadají všechny nejistoty stanovené jinak než statistickými metodami použitými při zpracování hodnot získaných opakovaným měřením. Složky standardní nejistoty typu B se stanovují z funkce hustoty pravděpodobnosti přiřazené

dané veličině, kterou měříme, a to především na základě dostupných informací a na základě zkušenosti.

Vše začíná vytipováním zdrojů standardních nejistot typu B a následným výpočtem standardní nejistoty každého jednotlivého zdroje. Následuje přepočítání jednotlivých zjištěných nejistot a posouzení možnosti korelace mezi jednotlivými zdroji nejistot, a pokud danou korelaci nalezneme, odhadneme hodnotu korelačního koeficientu a následně tyto hodnoty sloučíme do standardní nejistoty typu B.

Kombinovaná standardní nejistota – tato hodnota je v praxi nejpoužívanější, protože málokdy si můžeme dovolit zanedbat vliv jednoho nebo druhého typu nejistot. Touto nejistotou charakterizujeme výsledný účinek nejistot typu A a typu B na dané měření. Kombinovaná nejistota je stanovována podle zákona šíření nejistot. Výsledný vztah pro kombinaci nejistot je

$$u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2}$$

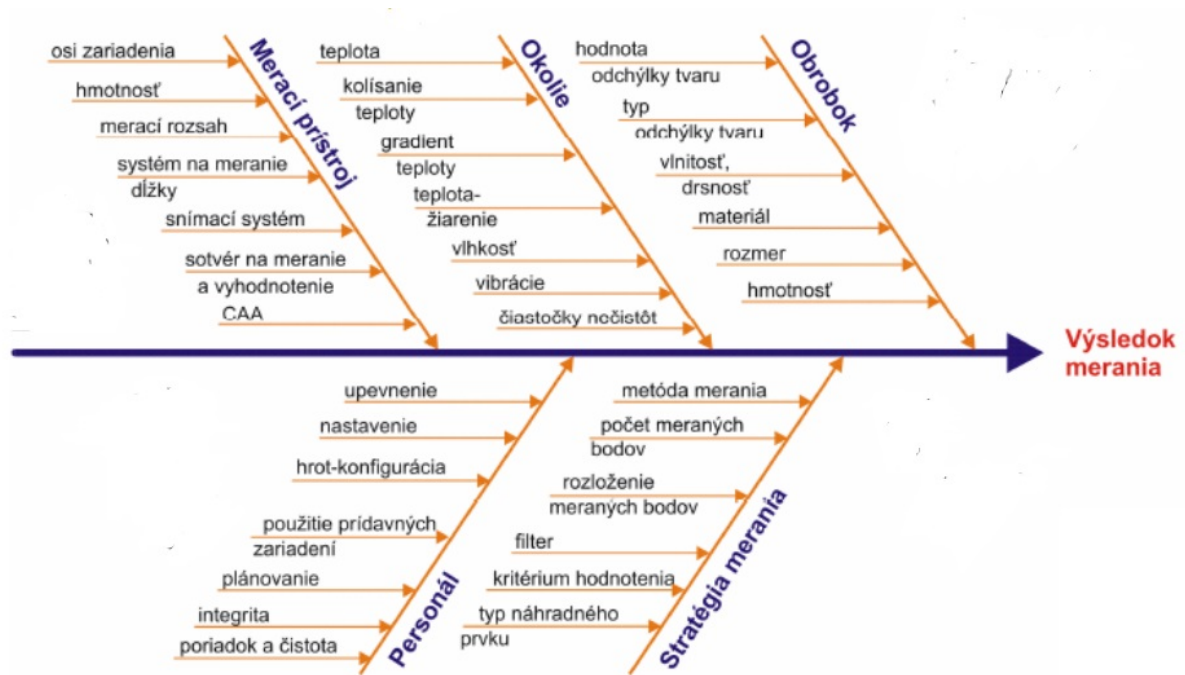
Kdy hodnota nejistot typu A je u_{Ay} a hodnota nejistot typu B u_{By} .

Rozšířená nejistota – nám udává pásmo okolo výsledné naměřené hodnoty, kde se s určitou pravděpodobností nachází skutečná hodnota měřené veličiny. Tato nejistota se získá vynásobením kombinované nejistoty měření koeficientem krytí, který vyjadřuje míru pravděpodobnosti, s jakou se v daném pásmu nalézá skutečná hodnota. Tento koeficient je závislý na efektivním počtu stupňů volnosti měřené veličiny a na míře pravděpodobnosti, kterou u výsledku požadujeme.

4.3 Zdroje nejistot měření

Za zdroje nejistot měření považujeme všechny vlivy, které negativně ovlivňují výsledek měření. Tyto vlivy zapříčiňují odchylku naměřené hodnoty od skutečné hodnoty měřené veličiny. Tyto rušivé vlivy je třeba eliminovat nebo alespoň omezit pro získání přesnějšího výsledku, o kterém můžeme poté říci, že se skutečné hodnotě měřené veličiny přibližuje.

Obecně lze říct, že nejistoty měření jsou dány nestálostí měřicího systému nebo jeho článků, ze kterých je tvořen. Tuto variabilitu především způsobují vlivy z následujících oblastí.



Obrázek 18 - oblasti zdrojů nejistot. Převzato a upraveno z [4]

4.3.1 Operátor

Obecně lze říci, že nejnestálejším a tím i nejslabším článkem celého měření je právě člověk. Ať už mluvíme o člověku, který vybírá metodu měření, měřidlo, určuje cíl měření a dále naměřené hodnoty zpracovává nebo o člověku, který dané měření provádí.

Z tohoto důvodu je nutné co nejvíce eliminovat jeho vliv. Operátor tedy musí splňovat řadu předpokladů a požadavků, aby bylo možné se na jím naměřené hodnoty spolehnout. Základním způsobem eliminace alespoň části nejistoty, kterou do měření operátor vnáší je jeho proškolení, a celková znalost měřidla či počítačového programu, který měřidlo ovládá. Dále je také nutné posoudit jeho zdravotní stav, zda je fyzicky schopen s měřidlem pracovat (kvalita zraku, atd.). Podstatná je také svědomitost, trénovanost a neustálé vzdělávání v problematice.

4.3.2 Metoda měření

Neméně důležitým vlivem na přesnost měření je správně zvolená metoda měření. Zde si musíme určit, zda pro měření budeme využívat dotykovou či bezdotykovou metodu měření a to s ohledem především na vlastnosti materiálu ze kterého je měřená součást vyrobena. Při tomto výběru musíme také brát v potaz další okolní vlivy, jako jsou například atmosférické podmínky, vibrace, čistota prostředí atd.

Při výběru dotykové měřicí sondy musíme také brát v potaz délku dřívku a jeho pracovní pozici. Při příliš dlouhém dřívku by mohlo docházet k jeho průhybům a tím i k získávání nepřesných výsledků měření.

Další důležitou součástí měřicí metody je správný výběr rozmístění a počtu snímaných bodů. Počet snímaných bodů musí být nejméně stejný jako minimální počet bodů pro definici daného elementu, ale vždy se tento počet navyšuje, aby bylo možné kontrolovat například rovinu plochy. S ohledem na vlastnosti povrchu měřené součásti není ale žádoucí zvýšit počet bodů nad rozumnou mez. Rozmístění měřených bodů je neméně důležité, protože pokud by body byly rozmístěny například ve středu plochy, o jejích okrajích bychom se nedozvěděli zcela nic.

4.3.3 Vyhodnocovací metoda

Po získání výsledků měření je důležité je dále zpracovat do použitelných informací. Zde záleží, jakou konkrétní matematickou metodu vybereme, jaké koeficienty či jejich přesnost vybereme, jak budeme zaokrouhlovat atd. Pokud například u nejistoty typu B zvolíme špatný koeficient krytí, výsledek měření tím můžeme znehodnotit tak, že se nevejde do tolerancí daných výkresovou dokumentací.

Samostatným zdrojem nejistoty měření je počítačový řídicí systém. Aby byl schopen data zpracovat, je nutné je převést do podoby, které daný systém rozumí. Při tomto převodu například z analogového signálu na digitální se může ztratit velké množství informací.

4.3.3 Prostředí

Vliv prostředí na přesnost měření je vskutku nezanedbatelný. Zvláště zásadní poté je, pokud se podmínky prostředí, ve kterém měření probíhá, mění.

Problém teplotní stálosti je nejvýraznější především u rozměrných součástí a to zvláště pokud jsou vyrobeny z materiálu s velkou tepelnou roztažností. Teplota stroje je ale neméně důležitým faktorem, jelikož tak dochází k deformacím například základního rámu stroje a tato deformace poté vnáší další nejistoty do měření.

Velkou roli v přesnosti měření hrají také vibrace. Zkracují životnost stroje a opotřebovávají pohonné mechanismy, které poté nejsou schopné přesných přesunů pohyblivých částí stroje. Příliš silné vibrace také způsobují například průhyby dřívku snímací hlavy, kvůli kterým nejsou naměřené hodnoty spolehlivé.

Žádoucí je bezprašné a obecně čisté prostředí a to z mnoha důvodů. Prach a nečistoty by mohly způsobovat nekonzistentní upínání součástí, pokud by se tyto nečistoty usazovaly na pracovním stole. V extrémních případech by tyto nečistoty také mohly způsobovat trhavé pohyby při přesouvání měřicí sondy.

4.3.4 Měřená součást

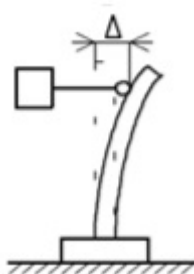
Velký podíl na přesnosti měření má také samotná měřená součást. Měřená součást může omezovat výběr měřicí metody nebo samotné měřicí hlavy. Další komplikace také mohou nastat, pokud je na dané součásti potřeba měřit nepřístupné oblasti nebo pokud není možné ji jednoduše upnout ke stolu měřicího systému.

Na základě povrchové úpravy měřené součásti musíme také vybírat průměr měřicí kuličky. Pokud je povrch součásti příliš drsný nebo obsahuje náhlé tvarové změny, nemusí docházet k sepnutím měřicí sondy na skutečném povrchu měřené součásti.



Obrázek 19 - vady povrchu. Převzato a upraveno z [4]

Při měření dlouhých nebo poddajných součástí je třeba také zvážit polohu, ve které bude součást upnuta. Při nesprávně zvolené poloze upnutí může docházet k průhybům, které výrazným způsobem zkreslí výsledek měření.



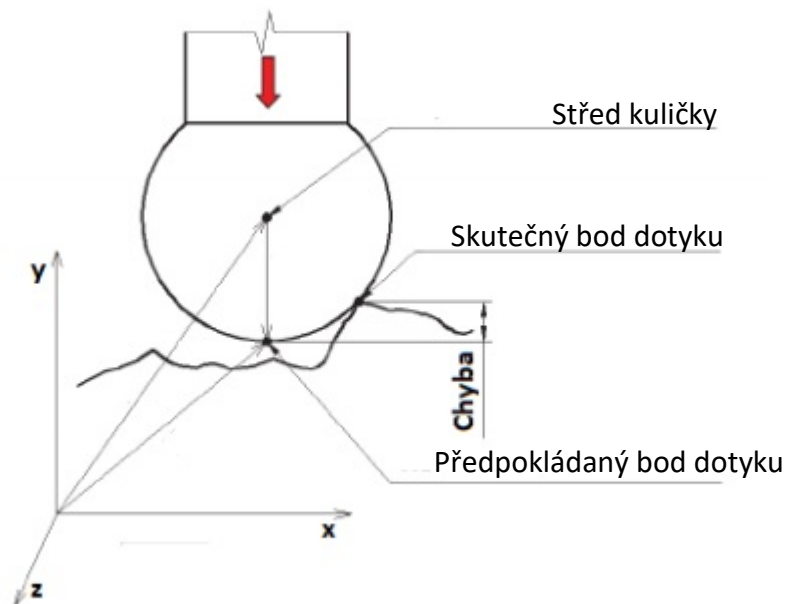
Obrázek 20 - prohýbání součásti. Převzato a upraveno z [4]

V neposlední řadě je také nutné udržovat povrch měřené součásti bez nečistot, které by jednak znehodnotily hodnotu měření v neočištěné oblasti, ale nečistoty by se mohly také nanést na měřicí kuličku a znehodnotit tak i všechna další měření.

4.3.5 Měřicí sonda

Za dobu životnosti měřicí sondy může dojít také k opotřebení měřicí kuličky. Toto je důležité, pokud měříme tvrdé materiály s drsným povrchem, kdy dojde k otěrům kuličky v místě nejčastějšího kontaktu s měřenou součástí. Při měření měkkých materiálů, jako je například hliník, sice nedochází k otěru kuličky, ale může docházet k nanášení vrstvy materiálu, ze které je vyrobena měřená součást, na měřicí kuličku. V obou případech opotřebení je výsledný rozměr kuličky v místě dotyku odlišný od hodnoty, se kterou počítá řídicí systém stroje.

Nejistoty měření se ale mohou projevat i u nové měřicí sondy. Tyto nejistoty mohou být způsobeny chybou přepočtu souřadnic měřeného bodu. V momentě kdy měřicí sonda zaznamená dotyk, jsou zaznamenány souřadnice středu měřicí kuličky. Tyto souřadnice jsou následně přepočítány na souřadnice předpokládaného místa dotyku. Problém nastává, pokud se předpokládané místo dotyku neshoduje se skutečným místem dotyku.



Obrázek 21 - chyba měřicí kuličky. Převzato a upraveno z [4]

V této kapitole bylo čerpáno především z: [1] a [3]

5 Modely pro testovací měření

Pro realizaci testovacích měření, při kterých bude možno vyzkoušet možnosti minimalizace nejistot měření stroje, je nutné připravit jednoduché modely, na kterých bude možné měřit různé tvarové a rozměrové úchyly. Výkresy a 3D modely použité při výrobě a měření testovacích modelů naleznete v přílohách k této bakalářské práci.

Omezujícími faktory při volbě modelů je samozřejmě maximální rozměr součásti, který lze na daném stroji měřit. Neméně důležitým omezením je také hmotnost modelu. Příliš těžký model by mohl deformovat ocelovou upínací desku umístěnou na měřicím stole měřicího zařízení, nemluvě o obtížné manipulaci s modelem. Příliš lehký model by naopak způsoboval potíže s jeho upnutím. Díky malým spínacím silám potřebným k sepnutí měřicí sondy, je možné měřené součásti o dostatečné hmotnosti vůbec neupínat. V případě nutnosti upnutí měřené součásti je nutné zvolit způsob upnutí, který nebude způsobovat deformace modelu.

5.1 Kvádr

Nejjednodušším tvarem pro měření je kvádr. Ačkoliv se jedná o nejjednodušší tvar modelu, lze na něm měřit několik rozměrů tvarů.

Tabulka 3 - rozměry kvádrů

	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]
Jmenovitý rozměr	100 ±0,1	60 ±0,1	30 ±0,1

Rozměry:

- Délka
- Šířka
- Výška

Tvary:

- Rovinnost
- Rovnoběžnost rovin
- Kolmost

5.2 Válec

Zajímavým tvarem modelu se jeví válec a to kvůli možnosti měření průměru a jeho válcovitosti. Na tomto modelu lze také zjišťovat házení hřídele.

Tabulka 4 - rozměry válce

	Délka [mm]	Průměr [mm]
Jmenovitý rozměr	42,5 ±0,1	32 ±0,1

Rozměry:

- Délka
- Průměr

Tvary:

- Házení
- Válcovitost

5.3 Kruh

Tento tvar modelu je zajímavý především z hlediska možnosti měření úchylek kruhovitosti modelu a to především jako rozdíl vnitřních a vnějších naměřených bodů. Z tohoto důvodu je nutné sejmout velký počet bodů, aby systém mohl vyhodnotit tyto úchytky kruhovitosti. Na tomto modelu bude také možné vyzkoušet různé konfigurace hvězdicového doteku. Na tomto modelu lze také měřit soustřednost vnitřního a vnějšího průměru.

Tabulka 5 - rozměry kruhu

	Průměr 1 [mm]	Průměr 2 [mm]	Výška [mm]
Jmenovitý průměr	33,5 ±0,1	27,75 ±0,05	34 ±0,1

Rozměry:

- Vnitřní/vnější průměr
- Výška

Tvary:

- Soustřednost
- Kruhovitost

6 Zdroje nejistot v praktickém prostředí

6.1 Teplota

Hlídaní teploty souřadnicového měřicího stroje, měřené součásti a jejich okolí je velmi důležité, protože jakákoliv změna teploty ovlivní měření. Velká část měřicího zařízení je vyrobena z materiálů se značnou teplotní roztažností. Pro ilustraci uveďme, že na způsobení chyby velikosti 1 μm na ocelovém výrobku dlouhém 100 mm stačí změna teploty o 1 $^{\circ}\text{C}$.

Souřadnicový měřicí stroj je konstruován pro práci v prostředí klimatizovaném na stabilních 20 $^{\circ}\text{C}$. Bohužel reálné podmínky neodpovídají předpokládaným ideálním podmínkám. Naměřená teplota v místnosti byla výrazně vyšší než ideální teplota. Reálná teplota se pohybuje mezi 24 $^{\circ}\text{C}$ a 24,5 $^{\circ}\text{C}$ v závislosti na dalších faktorech jako jsou například otevřené dveře nebo okno.

Řídící software Metrosoft CM obsahuje algoritmus pro kompenzaci chyby způsobené teplotní roztažností. Reálné teploty jednotlivých částí stroje a výrobku ale musejí být do programu zadány ručně, protože měřicí stroj neobsahuje teplotní čidla, ze kterých by bylo možné údaje automaticky přenášet do algoritmu.

6.2 Vibrace

Ideálním prostředím pro souřadnicový měřicí stroj je bezprašná, teplotně stálá místnost bez vibrací. Ve výrobní hale se však v blízkosti měřicího zařízení nachází mnoho obráběcích strojů. Tyto stroje generují vibrace, které pokud jsou dostatečně silné, mohou způsobovat náhodná sepnutí snímací hlavy, nebo rozechvívat měřenou součást o které bylo předpokládáno, že díky své velikosti a hmotnosti, nebude nutné ji pevně upínat k měřicímu stolu a tím riskovat způsobení deformací této součásti.

V případě výrobní haly v podniku MOTOR Jikov jsem jako zdroj nejsilnějších vibrací v bezprostředním okolí měřicího zařízení vysledoval ke konkrétnímu soustruhu, který měl lehce nevyvážené vřeteno. Při vysokých otáčkách soustruhu bylo na datech z odměřovacího systému měřicího stroje poznat, že vibrace způsobují nejistoty měření a mohou ovlivnit výsledek měření až o 2 μm na každé ze tří měřících os stroje.

6.3 Chyba stroje

Kvůli stáří měřicího stroje se začala projevovat chyba pojezdu portálu. Tato chyba způsobuje přerušení měřicího programu, protože řídicí systém dostává rozporuplné

informace o rychlosti a pohybu. Systém pohonu má vlastní kontrolu otáčení elektromotoru, který posouvá portál. Systém si nedokáže poradit s informací, že elektromotor se otáčí a odměřovací systém ve stejné chvíli nezaznamenává pohyb portálu. Z tohoto důvodu software raději přeruší program, aby nedošlo k poškození stroje.

Díky přítomnosti absolutního odměřování posuvu portálu není nutná nová kalibrace výchozího bodu stroje. Náprava této chyby je jednoduchá. Stačí znovu aktivovat servopohonu os příslušným tlačítkem na ovládacím panelu. V řídicím programu poté odsouhlasíme pokračování v měření. Nicméně z důvodu přerušení programu je nutné opakovat měření daného elementu či nové spuštění měřicího programu. Této chybě se lze vyvarovat omezením rychlostí posuvů a především omezením velikosti zrychlení posuvů.

6.4 Neúplnost kalibrací

Při zkoušení různých modulů měřicí hlavy s rozdílnými spínacími silami jsem si povšiml rozdílů v měřených hodnotách, které vybočovaly z běžných nejistot měření. Projevovala se systematická chyba měření způsobená neúplnou kalibrací všech modulů a dotyků na nich umístěných. Tato neúplnost kalibrací se projevovala posunutím naměřené hodnoty o konstantní hodnotu chyby, která byla řádově větší než chyby způsobené samotným opotřebením stroje nebo nepřiměřenou rychlostí posuvu při snímání hodnot.

6.5 Obsluha

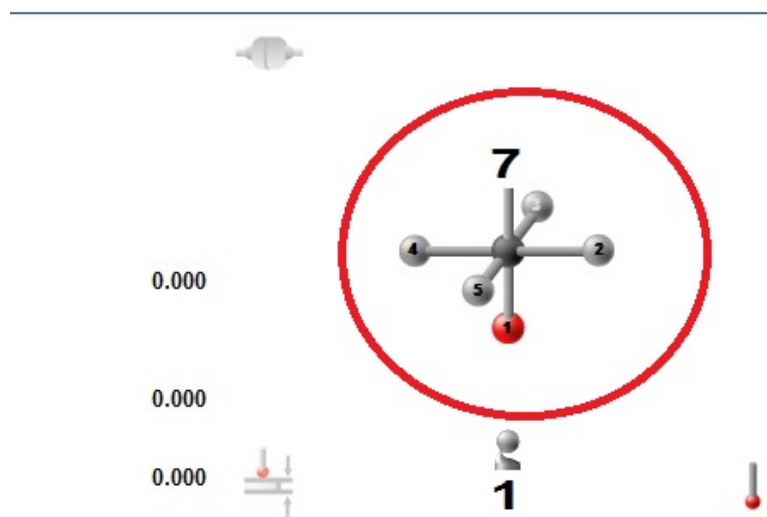
Hlavním zdrojem chyby, která může být způsobena obsluhou stroje, je nepřizpůsobení rychlosti posuvů. Pokud se při snímání jednotlivých bodů pohybuje měřicí sonda příliš velkou rychlostí, může docházet k ohýbání dřívku dotyku. Tento jev je nejvýraznější při použití modulu s vysokou spínací silou. Naopak použití modulu s nízkou spínací silou může způsobovat náhodná sepnutí a to zvláště v případě rychlé změny směru pohybu. Správný výběr měřicího modulu a dřívku s dotykovou kuličkou je tedy taktéž důležitým faktorem, o kterém rozhoduje právě obsluha stroje.

7 Postupy měření

7.1 Kalibrace dotyku

Kalibrace dotyku začíná umístěním kalibrační koule na pracovní desku stolu. Toto umístění může být v libovolném místě stolu, ale je důležité umístit kouli tak, aby byla přístupná pro dotyk, který chceme kalibrovat.

Dalším krokem je výběr dotyku v řídicím programu. Je také nutné vybrat umístění dotyku vůči měřicí hlavě.



Obrázek 22 - výběr dotyku. Zdroj: [autor]

Následně v horní liště programu vybereme záložku Sonda a zde Kalibrace dotyku. Vyplníme známé údaje o kalibrační kouli a spustíme kalibraci. Pokud máme zapnutý automatický režim, najedeme dotykem pouze na první bod na kouli a zbylé potřebné body si stroj najde sám. V manuálním režimu musíme sejmout počet bodů daný programem. Je dobré tyto body snímat na nejrůznějších místech kalibrační koule. Pokud používáme hvězdicový dotyk, musíme takto nakalibrovat každé jednotlivé rameno.

7.2 Manuální měření

Manuální měření se používá především při měření různorodých výrobků v malých sériích, kdy je zbytečné pro několik měření vytvářet měřicí program a zajišťovat opakovatelnost upnutí. Při tomto způsobu měření lze měřený výrobek umístit na libovolné místo na stole a není nutné jeho souřadný systém vyrovnávat se souřadnicovým systémem stroje. Hlavní nevýhodou tohoto způsobu měření je ovšem jeho neopakovatelnost z hlediska různých rychlostí přibližování doteku k měřené součásti. Tyto rozdílné rychlosti při každém měření mohou být příčinou rozdílů v naměřených hodnotách z důvodu chyby přejetí sondy.

7.2.1 Manuální ovládání

Pro ovládání pohybu měřicího stroje používáme joystick s funkčními tlačítky. Tento joystick je umístěn na ovládacím panelu spojeného se strojem poměrně dlouhým kabelem pro jeho snadné umístění do pozice, která je pro nás ergonomicky výhodná. Z toho samého důvodu je panel také na zadní straně vybaven magnetem a hákem pro přichycení panelu na bezpečné místo kde nehrozí, že bychom nedopatřením zavadili o joystick.

Základem tohoto ovládacího panelu je joystick. Pohybem joysticku vpřed a vzad ovládáme pohyb celého portálu. Pohybem vlevo a vpravo ovládáme pohyb pinoly po portálu a otáčením joysticku po směru nebo protisměru hodinových ručiček ovládáme pohyb pinoly nahoru a dolů. Snímání polohy joysticku je proporcionální a je tedy možné regulovat rychlost pohybů měřicího stroje citlivějším nakláněním joysticku.

K omezení maximální rychlosti posuvu při manuálním ovládání stroje slouží malý otočný knoflík vedle joysticku. Lze takto zpomalit stroj až téměř do úplného zastavení.

Neméně důležité je červené tlačítko na vrchní straně ovládacího panelu, které slouží pro nouzové zastavení stroje, pokud by hrozila kolize měřicí sondy s měřeným výrobkem.



Obrázek 23 - manuální ovládání.
Zdroj: [autor]

Důležitá tlačítka



Obrázek 24 - 1. Skupina funkčních tlačítek. Zdroj: [autor]

Z této skupiny je nejdůležitější tlačítko ve spodní řadě vpravo, které aktivuje joystick, aby jím šel ovládat pohyb stroje. Dalším důležitým tlačítkem je modrá šipka ve spodní řadě uprostřed, které přepíná funkce funkčních tlačítek. Tlačítko v horní řadě vpravo s prázdnou šipkou přepíná přiřazení posuvů os k pohybům joysticku.



Obrázek 25 - 2. Skupina funkčních tlačítek. Zdroj: [autor]

Tlačítka X, Y, Z a C zapínají a vypínají pohony jednotlivých os. Tato funkce se hodí, například pokud si chceme být jistí, že při pohybu joysticku pohneme pouze jednou osou. Tlačítkem vlevo dole přepínáme rychlosti posuvů. Tlačítko uprostřed ve spodní řadě zapíná samotný měřicí stroj.



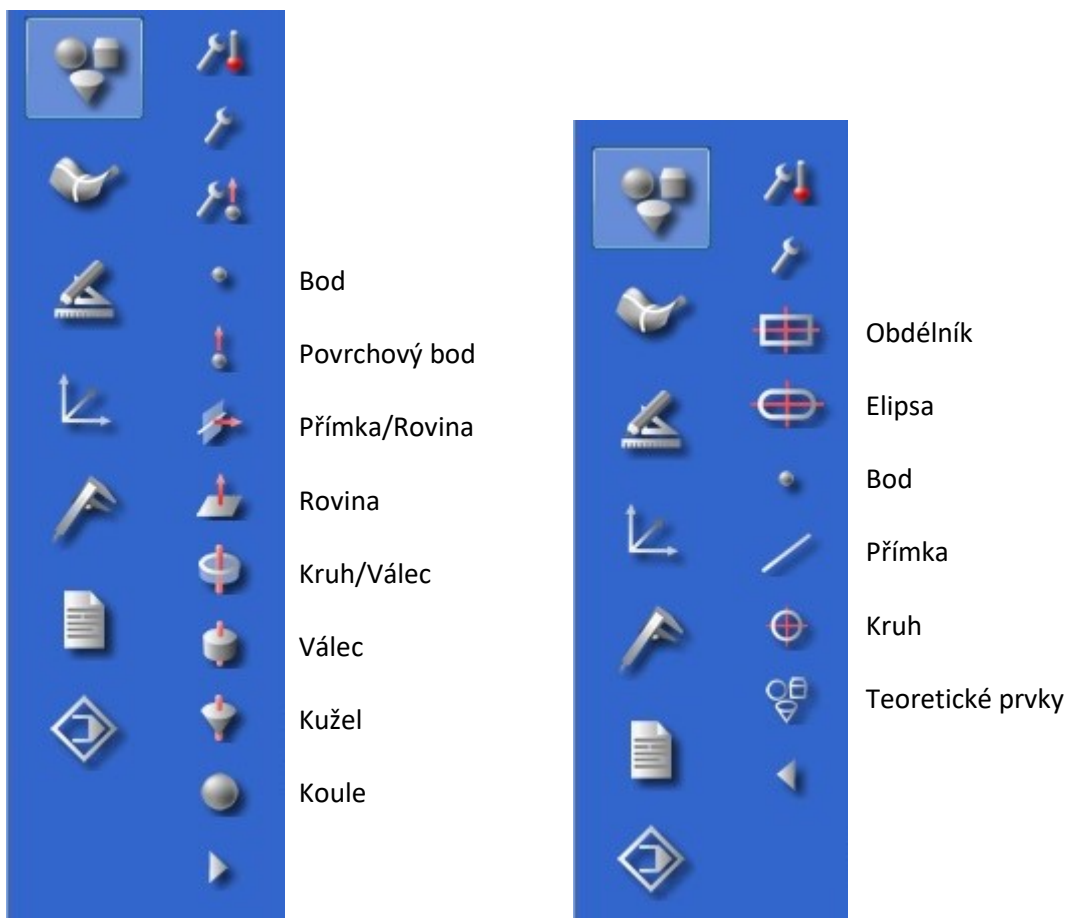
Obrázek 26 - 3 skupina funkčních tlačítek. Zdroj: [autor]

Tato funkční tlačítka mají přiřazenou funkci řídicím programem. Tyto funkce jsou viditelné na hlavní obrazovce řídicího programu ve spodní části obrazovky. Pro aktivaci

modře nadepsaných funkcí je třeba držet modrou šipku z první skupiny tlačítek a stisknout dané tlačítko funkce.

7.2.2 Postup manuálního měření

Ruční měření je ve své podstatě velmi jednoduché. V databance řídicího programu založíme složku nového výrobku či nového měření u již existujícího výrobku, pokud chceme provádět stejná měření na novém kusu výrobku stejného druhu, nebo pokud chceme porovnávat jednotlivá měření stejného kusu. Poté v ovládacím programu v liště při levém okraji vybereme element, jaký chceme měřit. Řídicí program nám poté určí počet bodů, které musíme sejmout, aby mohl řídicí program vyhodnotit požadovaná data. Řídicí program sice neurčuje rozložení snímaných bodů, ale je nutné mít stále na paměti, že pokud jsou snímané body příliš blízko u sebe, řídicí program je sice vyhodnotí, ale není možné zaručit dostatečnou přesnost měření i v případě, že řídicí program ukazuje velmi malý rozptyl naměřených hodnot. Nejlepší je rozložit snímané body přibližně rovnoměrně po měřeném elementu.



Obrázek 27 - výběr elementů k měření. Zdroj: [autor]

Po změření elementů máme možnost vyhodnocení naměřených hodnot. Stačí si vybrat, jaký vztah chceme zjistit mezi dvěma vybranými elementy, a řídicí program nám zobrazí daný vztah a případné odchylky. Tyto vyhodnocení se dají také zaznamenat do protokolu, jehož vzor je uložen v databance řídicího programu.



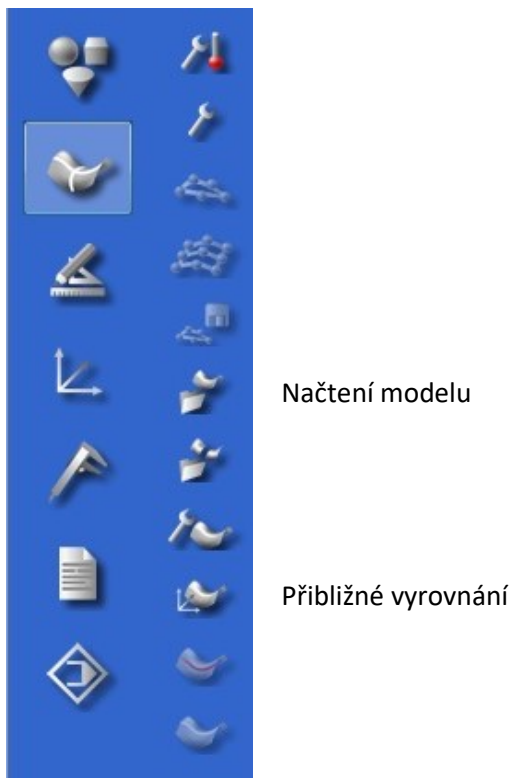
Obrázek 28 - vztahy mezi elementy. Zdroj: [autor]

7.3 Poloautomatické měření

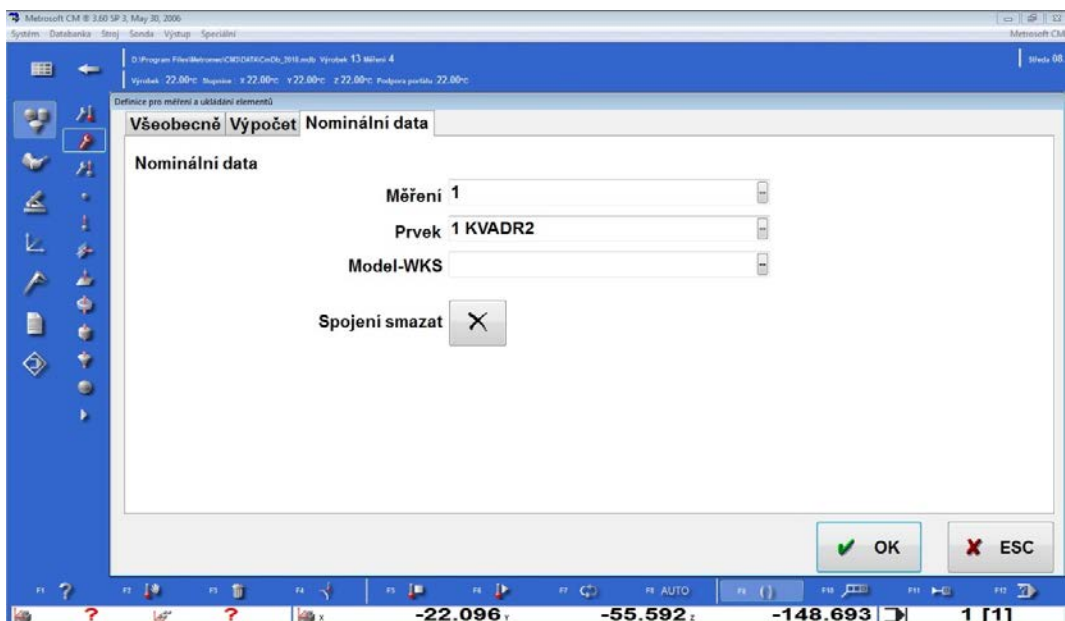
Tento způsob měření je zejména výhodný v případě, že máme k dispozici CAD model a chceme snímat větší množství bodů. Toto zjednodušení je výraznou úsporou času při měření. Poloautomatické měření se používá, především pokud nepotřebujeme sestavovat měřicí program, jehož sestavení by zabralo čas. Proto pokud například z důvodu velké rozmanitosti dílců a jejich malého počtu pro měření užíváme poloautomatického měření.

7.3.1 Postup poloautomatického měření

K poloautomatickému měření je nutné připnout již existující CAD model v řídicím programu. Tento CAD model je také nutné zobrazit v regulační grafice, abychom mohli vybírat elementy určené k měření.



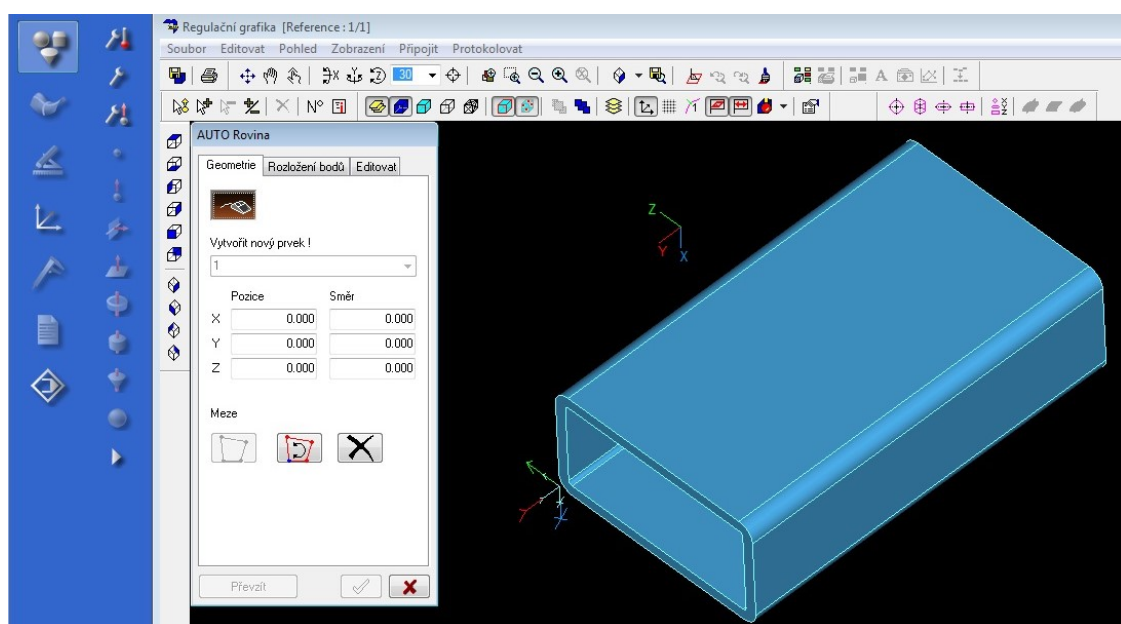
Obrázek 29 - načtení modelu. Zdroj: [autor]



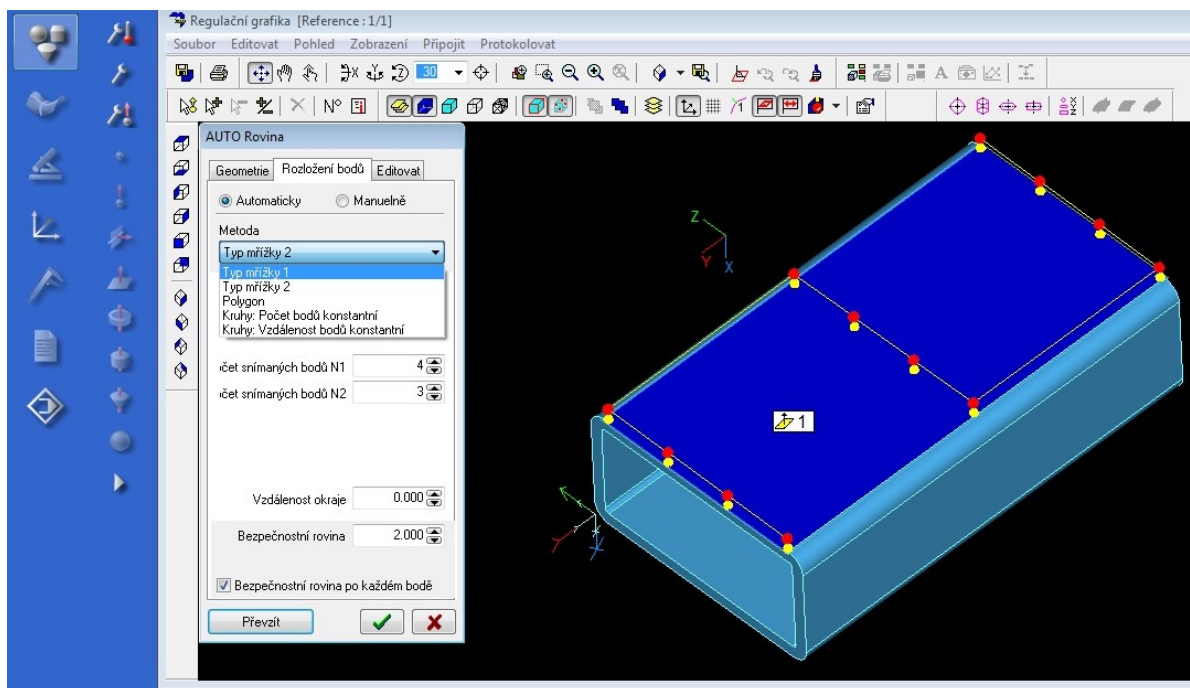
Obrázek 30 - přiřazení modelu. Zdroj: [autor]

Dalším krokem je vyrovnání součásti tak, aby souhlasila virtuální a skutečná pozice měřeného dílce vzhledem k měřicí sondě. Toto vyrovnání se provádí manuálním sejmutím několika ploch či plochy, přímky a bodu a určením primárního a sekundárního směru a počátku souřadného systému měřeného dílce

Po těchto úkonech vybíráme elementy k měření stejně jako při manuálním měření, s tím rozdílem, že se nám zobrazuje regulační grafika. V této grafice následně vybíráme elementy na CAD modelu, které chceme měřit a volíme při tom i počet a rozložení snímaných bodů.



Obrázek 31 - výběr měřeného elementu. Zdroj: [autor]



Obrázek 32 - výběr počtu a rozložení bodů. Zdroj: [autor]

Následně proběhne měření vybraného elementu v CNC režimu. Po zobrazení výsledných hodnot měření, můžeme stejně jako při manuálním měření, zaprotokolovat vztahy mezi jednotlivými změřenými elementy.

7.4 Automatické měření

Automatické měření se vyplatí používat především u dílců, na kterých měříme mnoho elementů a vztahů mezi nimi a ruční měření by proto bylo zdlouhavé a mohlo by dojít k chybě. Jednou z podmínek je také sériovost výroby. Pokud bychom měli měřit pouze několik dílců, nevyplatí se vytvářet měřicí program. Samotné programování není složité, ale je zdlouhavé zvláště z důvodu potřeby velké pozornosti, kterou musí obsluha věnovat této činnosti, aby nedošlo například ke kolizi měřicí sondy s měřeným dílcem. V tomto úkolu nám velmi pomáhá regulační grafika, kterou nám zobrazuje řídicí program. Dalším omezením je nutnost provedení vyrovnání nebo upnutí dílce, které lze zopakovat s velkou přesností. Vyrovnání dílce může být také časově náročné, zvláště pokud je tvarově rozmanitý a je potřeba vyrovnat několik elementů, aby virtuální pozice dílce v řídicím programu souhlasila s reálnou pozicí dílce. Návrh upnutí dílce tak aby jej bylo možné upnout s vysokou opakovatelností, může být také velmi problematické. Zvláště pokud z výroby přicházejí ke kontrole různé dílce a bylo by tak nutno upínací zařízení neustále přestavovat.

7.4.1 Postup tvoření programu

Stejně jako při manuálním a poloautomatickém měření založíme v databance složku nového výrobku či nového měření již existujícího výrobku. Následně v levé liště řídicího programu vybereme, zda chceme tvořit nový program nebo editovat již existující. Na začátku měřícího programu také připneme a zobrazíme CAD model měřeného dílce stejně jako při poloautomatickém měření.



Obrázek 33 - tvoření měřícího programu. Zdroj: [autor]

Po tomto připnutí a zobrazení CAD modelu provedeme vyrovnání nebo nahrajeme souřadnicový systém z databanky, pokud máme dílec upnutý v upínacím systému, jehož souřadnicový systém jsme si předem uložili do databanky.

Dále stejně jako při poloautomatickém měření vybíráme elementy, které chceme měřit. Zvolíme také množství a rozložení snímaných bodů. Také volíme, jaké vztahy mezi elementy chceme zaprotokolovat. Tímto postupem tak vkládáme do měřícího programu úseky kódu, které poté stroj automaticky vykoná.

Při vytváření programu je nutné mít na paměti nastavení bezpečnostní roviny, na kterou se má dotyk měřící sondy vrátit po každém sejmutém bodu. Také je nutné pečlivě

plánovat cestu měřicí sondy, jelikož se mezi jednotlivými polohami měření pohybuje po přímce bez ohledu na to, jestli se v cestě nachází měřený dílec či ne. Z tohoto důvodu je nutné vkládat do měřicího programu mezilehlé body, kterými musí měřicí sonda projet a tím se vyhnout měřenému dílci. Velké usnadnění tohoto úkolu je možnost offline programování. Offline programování znamená softwarové odpojení stroje a možnost simulace cesty měřicí sondy. Tímto způsobem je možné tvořit měřicí program, aniž bychom riskovali kolizi měřicí sondy s měřeným dílcem. Také je tímto způsobem možné vyzkoušet již existující měřicí program například z důvodu optimalizace cesty měřicí sondy.

Do programu lze také vkládat dialogová okna, která informují obsluhu například o prováděném úkonu, nebo o úkonu který obsluha musí vykonat pro správný průběh měření a funkci programu.

8 Naměřené hodnoty

Měření probíhalo v kontrolovaných podmínkách výrobní haly podniku Motor Jikov v Soběslavi. K dispozici jsem měl tři různé měřicí moduly a tři různé druhy doteků. Měřicí moduly se lišily hodnotou spínací síly. Konkrétně se jednalo o moduly označené jako Standard Force, Medium Force a Extreme Force. V případě doteků jsem používal přímý dotyk, hvězdicový dotyk a talířový dotyk.

8.1 Výchozí hodnoty

Za výchozí hodnoty považuji takové hodnoty, které jsem naměřil před jakýmikoliv úpravami stroje nebo jeho nastavení či kalibrací. Tyto výchozí hodnoty jsou přehledně uspořádány v následujících tabulkách.

8.1.1 Kvádr

Přímý dotyk

Tabulka 6 - výchozí hodnoty kvádrů, přímý dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Délka [mm]	100,0548 ±0,012486	100,0478 ±0,014681	100,0318 ±0,013847
Šířka [mm]	60,0784 ±0,010744	60,0615 ±0,011676	60,0467 ±0,013476
Výška [mm]	30,0648 ±0,011849	30,0467 ±0,011984	30,0349 ±0,012672
Rovinnost [mm]	0,0024 ±0,000265	0,0053 ±0,000297	0,0092 ±0,000387
Kolmost [mm]	0,0022 ±0,000198	0,0068 ±0,000219	0,0079 ±0,000298
Rovnoběžnost [mm]	0,0159 ±0,004678	0,0198 ±0,005123	0,0315 ±0,005937
Přímost [mm]	0,0053 ±0,003489	0,0097 ±0,003978	0,0124 ±0,004578

Hvězdicový dotyk

Tabulka 7 – výchozí hodnoty kvádr, hvězdicový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Délka [mm]	100,0045 ±0,009845	99,9875 ±0,012459	99,9684 ±0,012974
Šířka [mm]	60,0547 ±0,012678	60,0487 ±0,012967	60,0248 ±0,013786
Výška [mm]	30,0384 ±0,013151	30,0197 ±0,013873	30,0084 ±0,014128
Rovinnost [mm]	0,0031 ±0,000298	0,0057 ±0,000364	0,0071 ±0,000489
Kolmost [mm]	0,0029 ±0,000247	0,0041 ±0,000398	0,0059 ±0,000487
Rovnoběžnost [mm]	0,0178 ±0,006781	0,0278 ±0,007846	0,0384 ±0,008346
Přímmost [mm]	0,0072 ±0,003974	0,0098 ±0,004687	0,0134 ±0,006912

Talířový dotyk

Tabulka 8 – výchozí hodnoty kvádr, talířový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Délka [mm]	101,0187 ±0,029782	101,0048 ±0,030485	100,0946 ±0,031844
Šířka [mm]	61,0248 ±0,028647	61,0178 ±0,029478	60,9934 ±0,032816
Výška [mm]	31,0148 ±0,028796	31,0018 ±0,029981	30,9867 ±0,030482
Rovinnost [mm]	0,0052 ±0,001845	0,0068 ±0,002948	0,0089 ±0,003846
Kolmost [mm]	0,0054 ±0,000798	0,0073 ±0,002197	0,0086 ±0,002846
Rovnoběžnost [mm]	0,0289 ±0,003489	0,0384 ±0,004987	0,0467 ±0,005687
Přímmost [mm]	0,0122 ±0,004167	0,0168 ±0,005974	0,0267 ±0,006124

8.1.2 Válec

Přímý dotyk

Tabulka 9 - výchozí hodnoty válce, přímý dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr [mm]	31,9952 ±0,015846	31,9816 ±0,01665	31,9764 ±0,018848
Výška [mm]	42,7648 ±0,014974	42,6974 ±0,01647	42,6128 ±0,017993
Válcovitost [mm]	0,0059 ±0,001278	0,0068 ±0,001689	0,0076 ±0,001864
Házení [mm]	0,0060 ±0,002846	0,0079 ±0,003165	0,0098 ±0,003456

Hvězdicový dotyk

Tabulka 10 – výchozí hodnoty válce, hvězdicový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr [mm]	31,9880 ±0,015842	31,9736 ±0,016979	31,9697 ±0,018122
Výška [mm]	42,6987 ±0,016786	42,6184 ±0,017841	42,5687 ±0,018468
Válcovitost [mm]	0,0063 ±0,001487	0,0097 ±0,001898	0,0168 ±0,002798
Házení [mm]	0,0097 ±0,003684	0,0123 ±0,004267	0,0198 ±0,004987

Talířový dotyk

Tabulka 11 - výchozí hodnoty válce, talířový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr [mm]	32,8476 ±0,027846	32,7954 ±0,028121	32,6541 ±0,029784
Výška [mm]	43,1584 ±0,028461	43,0846 ±0,029789	42,9789 ±0,030172
Válcovitost [mm]	0,0079 ±0,002687	0,0153 ±0,005894	0,0268 ±0,006849
Házení [mm]	0,0284 ±0,007891	0,0348 ±0,012466	0,0578 ±0,034561

8.1.3 Kruh

Přímý dotyk

Tabulka 12 – výchozí hodnoty kruhu, přímý dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr 1 [mm]	31,9678 ±0,016784	31,9278 ±0,017561	31,8974 ±0,017896
Průměr 2 [mm]	27,8547 ±0,015676	28,0438 ±0,016128	28,1845 ±0,019671
Výška [mm]	34,0348 ±0,016182	33,9864 ±0,015986	33,7861 ±0,016872
Kruhovitost průměru 1 [mm]	0,0059 ±0,001687	0,0096 ±0,001879	0,0142 ±0,001789
Kruhovitost průměru 2 [mm]	0,0134 ±0,001798	0,0186 ±0,002946	0,0684 ±0,003489
Soustřednost [mm]	0,0186 ±0,002184	0,0268 ±0,006849	0,0849 ±0,089478

Hvězdicový dotyk

Tabulka 13 - výchozí hodnoty kruhu, hvězdicový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr 1 [mm]	31,9612 ±0,014787	31,8467 ±0,015781	31,7684 ±0,016376
Průměr 2 [mm]	27,8125 ±0,016496	27,9845 ±0,016376	28,0379 ±0,017244
Výška [mm]	33,9984 ±0,015891	33,8156 ±0,016494	33,7684 ±0,017865
Kruhovitost průměru 1 [mm]	0,0135 ±0,001987	0,0248 ±0,002986	0,0384 ±0,004387
Kruhovitost průměru 2 [mm]	0,0167 ±0,001892	0,0367 ±0,003178	0,0478 ±0,003897
Soustřednost [mm]	0,0213 ±0,003978	0,0489 ±0,005687	0,0589 ±0,009784

Talířový dotyk

Tabulka 14 - výchozí hodnoty kruhu, talířový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr 1 [mm]	32,6789 ±0,024581	32,6384 ±0,023871	32,3489 ±0,025986
Průměr 2 [mm]	27,2564 ±0,021846	27,4612 ±0,023487	27,5489 ±0,024977
Výška [mm]	34,5682 ±0,023597	34,4687 ±0,024893	34,2987 ±0,028943
Kruhovitost průměru 1 [mm]	0,0268 ±0,002489	0,0348 ±0,002978	0,0412 ±0,004562
Kruhovitost průměru 2 [mm]	0,0247 ±0,003178	0,0298 ±0,007984	0,0359 ±0,009874
Soustřednost [mm]	0,0348 ±0,012486	0,0467 ±0,016786	0,1648 ±0,067846

8.2 Konečné hodnoty

Po odstranění zdrojů nejistot měření jsem provedl novou sadu měření. Výsledky těchto měření jsem uspořádal do následujících tabulek.

8.2.1 Kvádr Přímý dotyk

Tabulka 15 - konečné hodnoty kvádrů, přímý dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Délka [mm]	100,0241 ±0,000975	99,9341 ±0,001332	99,8673 ±0,001791
Šířka [mm]	60,0453 ±0,001289	59,9528 ±0,001518	59,8364 ±0,002036
Výška [mm]	30,0385 ±0,001116	29,9462 ±0,001724	29,8572 ±0,001977
Rovinnost [mm]	0,0011 ±0,000100	0,0023 ±0,000138	0,0011 ±0,000124
Kolmost [mm]	0,0023 ±0,000120	0,0027 ±0,000151	0,0043 ±0,000215
Rovnoběžnost [mm]	0,0110 ±0,003246	0,0166 ±0,003980	0,0138 ±0,003458
Přímost [mm]	0,0032 ±0,002561	0,0052 ±0,003064	0,0056 ±0,003361

Hvězdicový dotyk

Tabulka 16 – konečné hodnoty kvádrů, hvězdicový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Délka [mm]	99,8844 ±0,001345	99,7682 ±0,001974	99,6212 ±0,001685
Šířka [mm]	59,9458 ±0,001437	59,8419 ±0,001768	59,7984 ±0,001598
Výška [mm]	29,9842 ±0,001391	29,7964 ±0,001894	29,7649 ±0,001834
Rovinnost [mm]	0,0021 ±0,000131	0,0035 ±0,000145	0,0052 ±0,000201
Kolmost [mm]	0,0025 ±0,000110	0,0056 ±0,000186	0,0067 ±0,000348
Rovnoběžnost [mm]	0,0126 ±0,002458	0,0152 ±0,002678	0,0186 ±0,002987
Přímost [mm]	0,0051 ±0,001384	0,0047 ±0,001982	0,0072 ±0,002185

Talířový dotyk

Tabulka 17 – konečné hodnoty kvádrů, talířový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Délka [mm]	100,2342 ±0,004879	100,1876 ±0,005718	100,0342 ±0,006305
Šířka [mm]	60,1897 ±0,004738	60,0764 ±0,005914	59,9845 ±0,006471
Výška [mm]	30,2313 ±0,005130	30,1672 ±0,005416	30,0376 ±0,006284
Rovinnost [mm]	0,0048 ±0,001487	0,0039 ±0,001379	0,0072 ±0,001678
Kolmost [mm]	0,0032 ±0,001378	0,0064 ±0,001579	0,0064 ±0,001647
Rovnoběžnost [mm]	0,0214 ±0,003548	0,0196 ±0,002845	0,0269 ±0,003986
Přímost [mm]	0,0079 ±0,003478	0,0082 ±0,003618	0,0107 ±0,002987

8.2.2 Válec

Přímý dotyk

Tabulka 18 - konečné hodnoty válce, přímý dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr [mm]	31,9640 ±0,001871	31,9638 ±0,002588	31,9634 ±0,002762
Výška [mm]	42,5212 ±0,002015	42,4916 ±0,002547	42,4853 ±0,002892
Válcovitost [mm]	0,0040 ±0,000707	0,0052 ±0,000913	0,0049 ±0,000847
Házení [mm]	0,0040 ±0,002121	0,0059 ±0,002046	0,0051 ±0,002261

Hvězdicový dotyk

Tabulka 19 – konečné hodnoty válce, hvězdicový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr [mm]	31,9616 ±0,002510	31,9542 ±0,001483	31,9372 ±0,002314
Výška [mm]	42,5143 ±0,002646	42,5013 ±0,002715	42,4937 ±0,002597
Válcovitost [mm]	0,0054 ±0,001456	0,0052 ±0,001746	0,0061 ±0,001638
Házení [mm]	0,0084 ±0,003492	0,0098 ±0,003947	0,0102 ±0,004134

Talířový dotyk

Tabulka 20 - konečné hodnoty válce, talířový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr [mm]	32,0290 ±0,005874	32,0094 ±0,006693	31,9988 ±0,007294
Výška [mm]	42,6924 ±0,005249	42,6714 ±0,005982	42,6598 ±0,006482
Válcovitost [mm]	0,0062 ±0,001924	0,0052 ±0,003899	0,0056 ±0,003209
Házení [mm]	0,0126 ±0,006618	0,0120 ±0,006481	0,0136 ±0,008444

8.2.3 Kruh

Přímý dotyk

Tabulka 21 – konečné hodnoty kruhu, přímý dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr 1 [mm]	33,4950 ±0,000707	33,4926 ±0,001517	33,4892 ±0,002049
Průměr 2 [mm]	27,7800 ±0,001414	27,7812 ±0,001304	27,7872 ±0,005848
Výška [mm]	33,9841 ±0,000914	33,9812 ±0,001384	33,9796 ±0,001876
Kruhovitost průměru 1 [mm]	0,0048 ±0,001095	0,0088 ±0,001643	0,0142 ±0,001789
Kruhovitost průměru 2 [mm]	0,0098 ±0,001304	0,0124 ±0,002510	0,0458 ±0,024243
Soustřednost [mm]	0,0120 ±0,001414	0,0174 ±0,007266	0,0948 ±0,067655

Hvězdicový dotyk

Tabulka 22 – konečné hodnoty kruhu, hvězdicový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr 1 [mm]	33,4913 ±0,000918	33,4875 ±0,001428	33,4728 ±0,001946
Průměr 2 [mm]	27,7782 ±0,001384	27,7804 ±0,001402	27,7952 ±0,001487
Výška [mm]	33,9267 ±0,001042	33,9297 ±0,001210	33,9186 ±0,001384
Kruhovitost průměru 1 [mm]	0,0032 ±0,001237	0,0068 ±0,002030	0,0072 ±0,003147
Kruhovitost průměru 2 [mm]	0,0087 ±0,001614	0,0245 ±0,003672	0,0287 ±0,003498
Soustřednost [mm]	0,0132 ±0,003487	0,0219 ±0,005849	0,0389 ±0,004987

Talířový dotyk

Tabulka 23 - konečné hodnoty kruhu, talířový dotyk

	Standard Force	Medium Force	Extreme Force
Průměr 1 [mm]	33,5794 ±0,003578	33,5516 ±0,003647	33,5372 ±0,013046
Průměr 2 [mm]	27,7026 ±0,004930	27,7170 ±0,004848	27,7358 ±0,010780
Výška [mm]	34,0631 ±0,004012	34,0418 ±0,003976	34,0268 ±0,011348
Kruhovitost průměru 1 [mm]	0,0032 ±0,001483	0,0112 ±0,001643	0,0048 ±0,003347
Kruhovitost průměru 2 [mm]	0,0034 ±0,002881	0,0058 ±0,005805	0,0074 ±0,005595
Soustřednost [mm]	0,0150 ±0,008944	0,0498 ±0,010232	0,1030 ±0,040817

9 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá především identifikací a minimalizací zdrojů nejistot měření na souřadnicovém měřicím stroji a to od pochopení principu fungování souřadnicového měřicího stroje až po praktická testovací měření. Přínosem této bakalářské práce je především zvýšení přesnosti měření na zastaralém souřadnicovém měřicím stroji Zeiss C400 ve výrobním procesu v podniku Motor JIKOV.

V první části této bakalářské práce jsou vysvětleny principy jednotlivých součástí souřadnicového měřicího stroje. Tyto komponenty jsou vyráběny v mnoha různých verzích, proto jsou zde uvedeny principy fungování několika nejpoužívanějších možností. Pochopení principu fungování souřadnicového měřicího stroje bylo důležité především z hlediska identifikace vnějších zdrojů nejistot měření.

Dalším krokem bylo prozkoumat měřicí software ovládající souřadnicový měřicí stroj a naučit se jej ovládat. V této části bakalářské práce byla největší překážkou absence jakéhokoliv uceleného manuálu nebo příručky. Jednotlivé prvky ovládání jsou popsány v této bakalářské práci. Prozkoumání softwaru vedlo k identifikaci vnitřních zdrojů nejistot měření, jako jsou nepřesné hodnoty zadávané do algoritmu pro kompenzaci teplotních roztažností jednotlivých částí stroje.

V praktické části bakalářské práce byl popsán postup měření na souřadnicovém měřicím stroji. Kvůli absenci manuálu či alespoň základního návodu, byl materiál čerpán především z osobních zkušeností autora s tímto měřicím strojem. Dále byla provedena zkušební měření na předem připravených modelech. První sada měření sloužila jako referenční hodnoty. Tyto hodnoty byly naměřeny před aplikací jakýchkoliv zlepšení pro minimalizaci nejistot měření. Už jen z porovnání se jmenovitými rozměry testovacích modelů bylo patrné, že stroj vykazuje velké nepřesnosti v měření. Druhá sada naměřených hodnot byla získána po aplikaci návrhů na minimalizaci nejistot měření. Z těchto hodnot vyplývá, že došlo ke zpřesnění výsledků měření.

Zadání bakalářské práce se podařilo splnit. V teoretické části jsou vysvětleny principy fungování stroje i jeho ovládání a navrženy modely pro testovací měření. V praktické části jsou pak tyto modely využity pro získávání naměřených hodnot. Tyto hodnoty jsou poté uspořádány do tabulek, ze kterých vyplývá zlepšení přesnosti měření na souřadnicovém měřicím stroji v podniku Motor JIKOV. Díky těmto zlepšením může být stroj i nadále používán.

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 - kartézsky uspořádané CMM. Přejzato a upraveno z [1].....	9
Obrázek 2 - Zeiss C 400. Přejzato a upraveno z [13].....	11
Obrázek 3 - ozubený převod. Přejzato a upraveno z [14].....	12
Obrázek 4 - vodící šroub. Přejzato a upraveno z [15]	13
Obrázek 5 - lineární elektromotor. Přejzato a upraveno z [12]	14
Obrázek 6 - kinematická sonda. Přejzato a upraveno z [9]	15
Obrázek 7 - zásobník modulů. Přejzato a upraveno z [8].....	17
Obrázek 8 - tenzometrická sonda. Přejzato a upraveno z [9]	17
Obrázek 9 - prosvětlovací měřítko. Přejzato a upraveno z [16]	20
Obrázek 10 - odrazové měřítko. Přejzato a upraveno z [10]	21
Obrázek 11 - rotační enkodér. Přejzato a upraveno z [17]	22
Obrázek 12 - indukcosynový systém. Přejzato a upraveno z [18]	23
Obrázek 13 - magnetický systém. Přejzato a upraveno z [19]	23
Obrázek 14 – interferometr. Přejzato a upraveno z [4]	24
Obrázek 15 - výchozí obrazovka. Zdroj: [autor]	25
Obrázek 16 - regulační grafika. Zdroj: [autor]	26
Obrázek 17 - normální rozdělení. Přejzato a upraveno z [3].....	30
Obrázek 18 - oblasti zdrojů nejistot. Přejzato a upraveno z [4].....	33
Obrázek 19 - vady povrchu. Přejzato a upraveno z [4]	35
Obrázek 20 - prohýbání součásti. Přejzato a upraveno z [4]	35
Obrázek 21 - chyba měřicí kuličky. Přejzato a upraveno z [4]	36
Obrázek 22 - výběr dotyku. Zdroj: [autor]	41
Obrázek 23 - manuální ovládání. Zdroj: [autor].....	42
Obrázek 24 - 1. Skupina funkčních tlačítek. Zdroj: [autor].....	43
Obrázek 25 - 2. Skupina funkčních tlačítek. Zdroj: [autor].....	43
Obrázek 26 - 3 skupina funkčních tlačítek. Zdroj: [autor]	43
Obrázek 27 - výběr elementů k měření. Zdroj: [autor].....	44
Obrázek 28 - vztahy mezi elementy. Zdroj: [autor]	45
Obrázek 29 - načtení modelu. Zdroj: [autor].....	46
Obrázek 30 - přiřazení modelu. Zdroj: [autor]	47
Obrázek 31 - výběr měřeného elementu. Zdroj: [autor].....	47
Obrázek 32 - výběr počtu a rozložení bodů. Zdroj: [autor].....	48

Obrázek 33 - tvoření měřicího programu. Zdroj: [autor].....	49
---	----

11 Seznam tabulek

Tabulka 1 - měřicí moduly. Převzato a upraveno z [8].....	16
Tabulka 2 - minimální počet bodů. Převzato a upraveno z [11].....	29
Tabulka 3 - rozměry kvádrů.....	37
Tabulka 4 - rozměry válce.....	38
Tabulka 5 - rozměry kruhu.....	38
Tabulka 6 - výchozí hodnoty kvádrů, přímý dotyk.....	50
Tabulka 7 – výchozí hodnoty kvádrů, hvězdicový dotyk.....	51
Tabulka 8 – výchozí hodnoty kvádrů, talířový dotyk.....	51
Tabulka 9 - výchozí hodnoty válce, přímý dotyk.....	51
Tabulka 10 – výchozí hodnoty válce, hvězdicový dotyk.....	51
Tabulka 11 - výchozí hodnoty válce, talířový dotyk.....	52
Tabulka 12 – výchozí hodnoty kruhu, přímý dotyk.....	52
Tabulka 13 - výchozí hodnoty kruhu, hvězdicový dotyk.....	52
Tabulka 14 - výchozí hodnoty kruhu, talířový dotyk.....	52
Tabulka 15 - konečné hodnoty kvádrů, přímý dotyk.....	53
Tabulka 16 – konečné hodnoty kvádrů, hvězdicový dotyk.....	53
Tabulka 17 – konečné hodnoty kvádrů, talířový dotyk.....	53
Tabulka 18 - konečné hodnoty válce, přímý dotyk.....	54
Tabulka 19 – konečné hodnoty válce, hvězdicový dotyk.....	54
Tabulka 20 - konečné hodnoty válce, talířový dotyk.....	54
Tabulka 21 – konečné hodnoty kruhu, přímý dotyk.....	54
Tabulka 22 – konečné hodnoty kruhu, hvězdicový dotyk.....	55
Tabulka 23 - konečné hodnoty kruhu, talířový dotyk.....	55

12 Seznam příloh

Příloha 1: Model kvádrů

Příloha 1.1: Výkres kvádrů

Příloha 2: Model válce

Příloha 2.1: Výkres válce

Příloha 3: Model kruhu

Příloha 3.1: Výkres kruhu

Seznam použité literatury

- [1] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [2] J. Čech, J. Perníkář, K. Podaný: *Strojírenská metrologie I*. CERM, 2009. ISBN 978-80-2144-010-4
- [3] Petřkovská, Lenka. TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE TEORETICKÝ ZÁKLAD [online], 2013, ISBN 978-80-248-3035-3. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/
- [4] Čepová, Lenka a Lenka Petřkovská. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch [online], 2011, ISBN 978-80-248-2514-4. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf
- [5] Úvod do souřadnicového měření. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>
- [6] Jak zkontrolovat přesnost dotykové sondy na SMS. Dostupně z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/solutions/technical-resources/metrology-101/how-to-check-cmm-touch-probe-accuracy>
- [7] Management kalibrace souřadnicového měřicího stroje (SMS) [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53766
- [8] TP20 [online]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/tp20--6670>

- [9] Snímací technologie a nová sonda OMP400 společnosti Renishaw s tenzometrickou technologií v ultra kompaktním provedení [online],[cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/cs/details/technicky-clanek-omp400-tenzometricka-sonda--19529>
- [10] Flora Digital prints with Renishaw's optical encoders [online]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/flora-digital-prints-with-renishaws-optical-encoders--39808>
- [11] CALYPSO – základní program, návod k obsluze, Divize Industrielle Messtechnik GmbH D-73446 Oberkochen, Datum vydání: 03/11, 2011
- [12] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3
- [13] <https://www.quietelectronics.com/Missouri-/Zeiss-c-400-manual-cmm.aspx>
- [14] <http://www.ozubene-hrebeny.cz/>
- [15] <https://e-konstrukter.cz/files/gallery/295447324-954.JPG>
- [16] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linear_Scale_Scheme.svg?uselang=cs
- [17] <https://m-gen.ru/raznoe-2/dlya-chego-nuzhen-enkoder-inkodery-naznachenie-vidy-xarakteristiki.html>
- [18] http://rauni.iea.lth.se:8074/eief05/pdf/kth_givare/bild/induktosyn.gif
- [19] <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-types-of-linear-encoders-are-there-and-how-do-i-choose/>