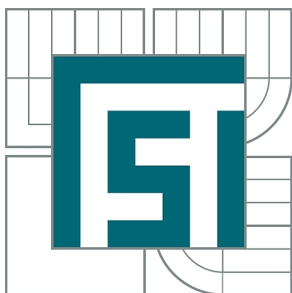


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY

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

## VLIV GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI VYBRANÝCH OBRÁBĚCÍCH CENTER NA POŽADOVANÉ VLASTNOSTI VÝROBKŮ

EFFECT OF GEOMETRICAL PRECISION MACHINING CENTERS ON THE DESIRED  
CHARACTERISTICS OF THE GOODS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. MICHAL HOLUB

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JIŘÍ MAREK, Dr.

BRNO 2011



## ABSTRAKT

Předmětem zkoumání této dizertační práce je vliv geometrické přesnosti velkých CNC obráběcích strojů na požadované vlastnosti obrobků. V globalizovaném tržním prostředí a udržení konkurenceschopnosti postupně změnili výrobci obráběcích strojů strategii pro dodávky „zboží“ zákazníkům. Nejedná se pouze o dodání výrobního stroje jako konstrukčního celku, ale se strojem jsou dodávány i předepsané technologie pro zpracování (obrábění). Při přejímce výrobního stroje vidí zákazník nový obráběcí stroj, který obrobí jím specifikovaný obrobek s požadovanou přesností.

V předložené dizertační práci je představen vývoj nové metodiky měření svislých soustruhů pro predikování vybraných geometrických vlastností obrobků. Cílem práce bylo zjistit vliv geometrické přesnosti vybraných konstrukčních částí svislého soustruhu na budoucí geometrickou přesnost obrobku. Jako testovaný stroj byl zvolen svislý soustruh SKIQ30 z produkce firmy TOSHULIN, a.s., na kterém byla navržená metodika měření zpracována a ověřena. Pro identifikaci vybraných parametrů svislého soustruhu byla nasazena měřicí aparatura využívající nejnovější technologie z oblasti metrologie. Základním nástrojem pro zpracování výsledků byly statistické metody pro predikování chování měřených konstrukčních celků stroje. Podkladem ke statistickému zpracování byly výpočty geometrických odchylek získané z algoritmů pro navrženou metodiku měření.

Navržená metodika měření pro svislé soustruhy byla rozdělena do dvou částí. V první části byla řešena metodika měření a vyhodnocení lineárních os, přičemž bylo využito měřicího zařízení Laser Trackeru. Zde bylo zjištěno, že princip měření pomocí Laser Trackeru je ideální pro navrženou metodiku měření. Z hlediska přesnosti přístroje byly v práci učiněny příslušné závěry. Druhá část navržené metodiky měření bylo sledování a popsání chování rotační desky, kde jako hlavními měřicími přístroji byly zvoleny bezkontaktní snímače vzdálenosti.

V průběhu řešení dizertační práce bylo zjištěno, že sledované (geometrické) chování stroje je z velké části ovlivněno podmínkami pro obrábění. Mezi tyto podmínky, které byly sledovány, patří zatížení rotační desky hmotností obrobku, otáčky rotační desky a doba chodu stroje. Na základě těchto poznatků lze konstatovat, že pro predikování vlastností obrobků je nezbytné znát chování stroje, které odpovídá celému rozsahu pracovních otáček a zatížení rotační desky.

Část navržené metodiky měření svislých soustruhů se jeví, jako velice vhodná pro vytvoření diagnostického systému aplikovatelného na velké rotační desky. Dále je uvažováno zabývat se rozšířením dizertační práce (navržené metodiky měření) za účelem návrhu jednotky pro kompenzaci chyb vzniklých na rotačních deskách svislých soustruhů.

## ABSTRACT

The main subject of this doctoral thesis is the influence of the geometrical accuracy of large CNC machine tools on desired features of produced work pieces. Due to globalized market environment and competition producers of machine tools have changed their strategy for delivery of their products to customers. The main issue is not only to deliver a machine tool as such; supporting instructions related to the technology of the cutting process on the machine tool are of great importance. When taking delivery, the customer can see a new machine tool that will produce by him specified work piece with a desired accuracy.

In the proposed thesis, a development of a novel methodology of measuring vertical lathes for prediction of chosen geometrical parameters of work pieces is introduced. The main goal of this work has been to determine the influence of the geometrical accuracy of selected design groups of a vertical lath on the future geometric accuracy of the work piece. The proposed methodology has been developed and verified on a selected vertical lath SKIQ30 produced by TOSHULIN, a.s. For identification of chosen parameters of the vertical lath a measuring system using latest measuring technologies has been applied. The basic tool for measured data processing has been a set of statistic methods for prediction of behaviour of measured design groups of the machine. The foundation for statistical processing has been calculation of geometrical deviations obtained from algorithms designed for proposed measurement methodology.

The proposed measurement methodology for vertical lathes has been divided into two parts. In the first part, the methodology of measurement and evaluation of linear axes is solved, where a measuring system Laser Track has been used. The employment of the system Laser Track turned out to be very suitable. Conclusions related to the accuracy of the measuring device have been drawn in the thesis. The second part of the proposed methodology is represented by observation and description of the rotating disk, where non-contact position transducers have been used.

In the course of the doctoral dissertation it has been observed that the studied (with respect to the geometry) behaviour of the machine is significantly affected by the cutting conditions. To these belong the loading of the rotating disc by the mass of the work piece, angular velocity of the rotating disc and the operating time of the machine. Based on these observations it can be stated that for prediction of work piece features it is essential to know the behaviour of the machine tool in the whole range of the operating speeds and loading of the rotating disc.

A part of the proposed methodology for measuring vertical lathes seems to be very suitable for a design of a diagnostic system that could be applied on large rotating disc. Furthermore, it is recommended to extend the doctoral thesis in order to develop a unit for compensation of geometrical errors on rotating discs of vertical lathes.



## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Geometrická přesnost, přesnost polohování, svislé soustruhy, predikce

## **KEYWORDS**

Geometric accuracy, positioning accuracy, vertical lathes, prediction

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOLUB, Michal . *Vliv geometrické přesnosti vybraných obráběcích center na požadované vlastnosti výrobků*. Brno, 2011. 192 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce prof. Ing. Jiří Marek, Dr.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci s názvem Vliv geometrické přesnosti vybraných obráběcích center na požadované vlastnosti výrobků vypracoval samostatně a jen na základě citovaných zdrojů a za podpory školitele.

.....  
Michal Holub

30. 11. 2011

## PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych rád touto cestou poděkoval svému školiteli prof. Ing. Jiřímu Markovi, Dr. za odborné vedení a podporu, která se mi dostávala v celém průběhu doktorského studia. Dále bych chtěl poděkovat panu Doc. Ing. Petru Blechovi, Ph.D. za odborné konzultace a podporu při řešení dizertační práce.

Dále bych rád touto cestou poděkoval panu Doc. Ing. Ivanu Vavříkovi, CSc. a dalším kolegům Ing. Františku Bradáčovi, Ph.D., Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D., Ing. Miroslavu Oplovi z Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky za odbornou pomoc, bez které by tato práce nemohla být dokončena. Mé díky patří také Doc. RNDr. Zdeňku Karpíškovi, CSc., který mi byl nápomocen při řešení statistických úkolů. Dále bych rád poděkoval panu Synkovi a panu Škařupovi (oba z TOSHULIN, a.s.) za odborné konzultace, pomoc při přípravě a realizaci zkoušek na svislém soustruhu v prostorách firmy TOSHULIN, a.s.

V neposlední řadě chci poděkovat mojí rodině, bez jejíž podpory by tato práce nemohla nikdy vzniknout, a také bych chtěl velmi poděkovat mojí Martince.

## OBSAH

|       |                                                                                     |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | ÚVOD .....                                                                          | 16 |
| 2     | SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....                                             | 17 |
| 2.1   | Aktuální stav poznání pracovní přesnosti obráběcích strojů .....                    | 19 |
| 2.2   | Vymezení pojmů .....                                                                | 20 |
| 2.2.1 | <i>Geometrická přesnost OS</i> .....                                                | 20 |
| 2.2.2 | <i>Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy</i> .....                             | 21 |
| 2.2.3 | <i>Kinematická přesnost</i> .....                                                   | 21 |
| 2.2.4 | <i>Predikce</i> .....                                                               | 21 |
| 2.2.5 | <i>Nejistota měření</i> .....                                                       | 22 |
| 2.2.6 | <i>Systémový postup, systémový přístup</i> .....                                    | 22 |
| 3     | CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....                                                         | 23 |
| 3.1   | Motivace.....                                                                       | 23 |
| 3.2   | Definice problémů.....                                                              | 23 |
| 3.3   | Cíle řešení dizertační práce .....                                                  | 24 |
| 3.4   | Očekávaný přínos dizertační práce .....                                             | 24 |
| 3.5   | Zvolené metody zpracování dizertační práce.....                                     | 24 |
| 4     | SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PŘI NÁVRHU TECHNICKÉ SOUSTAVY .....                               | 26 |
| 4.1   | Soustava a systém .....                                                             | 27 |
| 4.1.1 | <i>Prvek a soustava</i> .....                                                       | 27 |
| 4.1.2 | <i>Systém</i> .....                                                                 | 27 |
| 4.2   | Systémový přístup.....                                                              | 27 |
| 4.3   | Struktura technické soustavy .....                                                  | 30 |
| 4.4   | Algoritmus systémového přístupu dle marka [28] .....                                | 32 |
| 4.4.1 | <i>Specifikace struktur technické soustavy</i> .....                                | 32 |
| 4.4.2 | <i>Zobrazení algoritmu systémového přístupu při návrhu technické soustavy</i> ..... | 33 |
| 5     | TESTOVANÝ STROJ .....                                                               | 34 |
| 5.1   | Popis stroje.....                                                                   | 34 |
| 5.2   | Kinematika stroje .....                                                             | 35 |
| 6     | NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ .....                                                         | 37 |
| 6.1   | Rozbor problematiky.....                                                            | 37 |

|        |                                                                                                        |     |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2    | Současné přístupy ke zjišťování geometrických chyb obráběcích strojů .....                             | 47  |
| 6.3    | Měřicí technika .....                                                                                  | 48  |
| 6.4    | Návrh měření.....                                                                                      | 53  |
| 6.4.1  | Identifikace chyb obrobku z chyb na stroji .....                                                       | 53  |
| 6.4.2  | Stav vědy a techniky v oblasti popisu geometrických odchylek obrobku .....                             | 58  |
| 6.4.3  | Lineární osy svislého soustruhu .....                                                                  | 65  |
| 6.4.4  | Návrh měření rotační osy.....                                                                          | 95  |
| 6.4.5  | Celková odchylka ideálního bodu rotační desky od skutečné definované chybami z naměřených hodnot ..... | 119 |
| 6.4.6  | Celková chyba od translace a rotace .....                                                              | 123 |
| 6.4.7  | Negativní faktory ovlivňující přesnost vyhodnocených dat.....                                          | 133 |
| 6.5    | Využití navržené metodiky měření .....                                                                 | 137 |
| 6.6    | Technicko-ekonomické zhodnocení .....                                                                  | 138 |
| 6.7    | Systémový přístup návrhu metodiky měření svislých soustruhů .....                                      | 140 |
| 7      | PŘÍNOS PRÁCE .....                                                                                     | 144 |
| 8      | ZHODNOCENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE .....                                                                 | 145 |
| 9      | ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ .....                                                                              | 147 |
| 10     | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....                                                                        | 150 |
| 11     | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....                                                                | 156 |
| 12     | VLASTNÍ PUBLIKACE.....                                                                                 | 158 |
| 13     | TVŮRČÍ AKTIVITY A PROJEKTY .....                                                                       | 159 |
| 14     | OSTATNÍ ČINNOST .....                                                                                  | 161 |
| 15     | SEZNAM PŘÍLOH .....                                                                                    | 163 |
| 16     | PŘÍLOHY .....                                                                                          | 164 |
| 16.1   | Příloha číslo 1 - Terminologie – Přesnost najetí do polohy .....                                       | 164 |
| 16.1.1 | Terminologie – Přesnost najetí do polohy .....                                                         | 164 |
| 16.1.2 | Dle norem ČSN ISO 230-1, 2, DIN ISO 230-1,2 .....                                                      | 164 |
| 16.1.3 | Dle směrnice VDI/DGQ 3441 .....                                                                        | 167 |
| 16.1.4 | Dle úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví .....                           | 169 |
| 16.1.5 | Zhodnocení.....                                                                                        | 169 |
| 16.2   | Příloha č. 2 – Přesnost chodu rotační desky.....                                                       | 170 |
| 16.3   | Příloha č. 3 – Přesnost konstrukčních uzlů na TCP .....                                                | 173 |
| 16.4   | Příloha číslo 4 – Výsledky měření lineárních os.....                                                   | 178 |

---

 Vliv geometrické přesnosti vybraných obráběcích center na požadované vlastnosti výrobků
 

---

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.5 Příloha číslo 5 - Hodnoty tabulky pro statistické zpracování dat ..... | 179 |
| 16.6 Příloha číslo 6 – Chování odchylky Delta57 .....                       | 180 |
| 16.7 Příloha číslo 7 - Držák IN_081 .....                                   | 183 |
| 16.8 Příloha číslo 8 - Výsledky diplomové práce .....                       | 184 |
| 16.9 Příloha číslo 9 – Dokumentace z měření svislého soustruhu .....        | 186 |
| 16.10 Příloha číslo 10 – Životopis .....                                    | 190 |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1 Analýza problému [59].                                                                                         | 28 |
| Obr. 2 Systémový přístup [59].                                                                                        | 30 |
| Obr. 3 Obecné schéma technické soustavy [28].                                                                         | 31 |
| Obr. 4 Hierarchické uspořádání systémového přístupu [28].                                                             | 31 |
| Obr. 5 Obecný model postupu konstruování technického objektu [61].                                                    | 33 |
| Obr. 6 Svislý soustruh SKIQ30 a jeho kinematické schéma [29].                                                         | 35 |
| Obr. 7 Vývojový diagram pro předběžný návrh volby obráběcího centra dle požadavků zákazníka.                          | 38 |
| Obr. 8 Výkres budoucího obrobku [29].                                                                                 | 39 |
| Obr. 9 Výrobní program TOSHULIN                                                                                       | 40 |
| Obr. 10 Úchylka kruhovitosti [35].                                                                                    | 43 |
| Obr. 11 Úchylka válcovitosti [35].                                                                                    | 44 |
| Obr. 12 Úchylka přímosti [35].                                                                                        | 44 |
| Obr. 13 Úchylka kolmosti [35].                                                                                        | 45 |
| Obr. 14 Úchylka rovnoběžnosti [35].                                                                                   | 45 |
| Obr. 15 Úchylka souososti [35].                                                                                       | 46 |
| Obr. 16 Úchylka čelního házení [35].                                                                                  | 46 |
| Obr. 17 Úchylka obvodového házení [35].                                                                               | 47 |
| Obr. 18 V levé části obrázku je zobrazen MT-Check fy. IBSPE a v pravé části je zobrazen AxiSet Check-UP fy. RENISHAW. | 48 |
| Obr. 19 Ukázka zpracování zkoušek podle Schlesingera.                                                                 | 49 |
| Obr. 20 Systém Laerinterferometr fy. RENISHAW                                                                         | 50 |
| Obr. 21 V současnosti nabízené Laser Trackery.                                                                        | 51 |
| Obr. 22 Schéma Laser Trackeru T3, fy. API [42] – vlevo, Laser Tracker fy. Faro – vpravo [32].                         | 51 |
| Obr. 23 Princip snímání paprsku [32].                                                                                 | 52 |
| Obr. 24 Princip Laser Traceru fy. ETALON AG založený na GPS systému [40].                                             | 52 |
| Obr. 25 Blokové schéma svislého soustruhu.                                                                            | 54 |
| Obr. 26 Blokové schéma karuselu PWT – 2. Stupeň.                                                                      | 54 |
| Obr. 27 Blokové schéma příčnicku karuselu PWT – 3. Stupeň.                                                            | 55 |
| Obr. 28 Blokové schéma suportu karuselu PWT – 3. Stupeň.                                                              | 55 |
| Obr. 29 Blokové schéma smykadla karuselu PWT – 3. Stupeň.                                                             | 56 |
| Obr. 30 Blokové schéma rotační desky karuselu PWT – 3. Stupeň.                                                        | 56 |
| Obr. 31 Výsledky simulací obrobku při vodorovném soustružení dle Anand [41].                                          | 59 |
| Obr. 32 Zařízení pro zprostředkování odchylek kruhovitosti a rovnoběžnosti s osou Z [42].                             | 60 |

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 33 Působení natočení a translačního pohybu rotační desky na výsledné házení v rozdílných polohách na ose Z [42]. | 61 |
| Obr. 34 Vyhodnocení naměřených bodů [42].                                                                             | 62 |
| Obr. 35 Chyby vzniklé při vodorovném soustružení [43].                                                                | 62 |
| Obr. 36 Podmínky pro výpočet deformace [43].                                                                          | 63 |
| Obr. 37 Schéma predikování geometrické přesnosti obrobku [43].                                                        | 64 |
| Obr. 38 Měření přesnosti najetí do osy X na SKIQ30, v.č. 1604.                                                        | 66 |
| Obr. 39 Výsledek měření přesnosti najetí do osy X na SKIQ30, v.č. 1604.                                               | 66 |
| Obr. 40 Výsledek měření přesnosti najetí do osy Z na SKIQ30, v.č. 1604.                                               | 67 |
| Obr. 41 Schéma principu přestavení osy q.                                                                             | 68 |
| Obr. 42 Princip minimalizace chyb od Laser Trackeru.                                                                  | 70 |
| Obr. 43 Vliv polohy Laser Trackeru na výsledné přesnosti [48].                                                        | 70 |
| Obr. 44 Ustavení Laser Trackeru vůči SKIQ30.                                                                          | 71 |
| Obr. 45 Standardní zkušební cyklus, cyklus se zpětným krokem, cyklus s kyvadlovým krokem [30].                        | 71 |
| Obr. 46 Schéma najíždění q, Z, X při měření Laser Trackerem, síť měřených bodů.                                       | 72 |
| Obr. 47 Počet poloh v ose Z při polohách příčnicku q.                                                                 | 72 |
| Obr. 48 Princip korekce měřených bodů.                                                                                | 73 |
| Obr. 49 Postup při zpracování dat z Laser Trackeru.                                                                   | 74 |
| Obr. 50 Závislost výsuvu smykadla na poloze suportu X = 40 mm.                                                        | 75 |
| Obr. 51 Závislost výsuvu smykadla na poloze suportu X = 1 000 mm.                                                     | 75 |
| Obr. 52 Závislost výsuvu smykadla na poloze suportu X = 1 640 mm.                                                     | 76 |
| Obr. 53 Závislost pohybu suportu na výsuvu smykadla Z = 80 mm.                                                        | 76 |
| Obr. 54 Závislost pohybu suportu na výsuvu smykadla Z = 360 mm.                                                       | 77 |
| Obr. 55 Závislost pohybu suportu na výsuvu smykadla Z = 760 mm.                                                       | 77 |
| Obr. 56 Zpracovaná data z měření pro statistické vyhodnocení.                                                         | 78 |
| Obr. 57 Síť zpracovaných bodů.                                                                                        | 79 |
| Obr. 58 Predikce odchylky DX při posuvu TCP ve směru osy Z.                                                           | 80 |
| Obr. 59 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy Z.                                                           | 81 |
| Obr. 60 Predikce odchylky DX při posuvu TCP ve směru osy Z.                                                           | 81 |
| Obr. 61 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy Z.                                                           | 82 |
| Obr. 62 Predikce odchylky DX při posuvu TCP ve směru osy Z.                                                           | 82 |
| Obr. 63 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy Z.                                                           | 83 |
| Obr. 64 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy X.                                                           | 83 |
| Obr. 65 Predikce odchylky DZ při posuvu TCP ve směru osy X.                                                           | 84 |
| Obr. 66 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy X.                                                           | 84 |
| Obr. 67 Predikce odchylky DZ při posuvu TCP ve směru osy X.                                                           | 85 |
| Obr. 68 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy X.                                                           | 85 |
| Obr. 69 Predikce odchylky DZ při posuvu TCP ve směru osy X.                                                           | 86 |
| Obr. 70 Chyba polohy TCP ovlivňující chybu obrobku.                                                                   | 87 |
| Obr. 71 Chyba TCP při výsuvu smykadla v poloze suportu X = 40 mm.                                                     | 89 |



|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obr. 72 Posunutí bodu ovlivněné chybami na TCP vůči souřadnému systému rotační desky.....     | 89  |
| Obr. 73 Chyby vzniklé při posuvu v ose Z.....                                                 | 90  |
| Obr. 74 Linearizované průběhy chyb při posuvu v ose Z. ....                                   | 91  |
| Obr. 75 Závislost odchylky od ideálního poloměru na poloze Z a poloze příčnicku. ....         | 91  |
| Obr. 76 Schéma identifikace chyb při posuvu v ose X. ....                                     | 92  |
| Obr. 77 Naměřené hodnoty chyby DY při posuvu TCP v ose X. ....                                | 93  |
| Obr. 78 Linearizované průběhy chyb při posuvu v ose X.....                                    | 94  |
| Obr. 79 Závislost odchylky od ideálního poloměru na poloze X a poloze příčnicku<br>57. ....   | 94  |
| Obr. 80 Průběh chyby vzniklé při posuvu v ose X proložený polynomem. ....                     | 94  |
| Obr. 81 Závislost odchylky od ideálního poloměru na poloze X a poloze příčnicku<br>57. ....   | 95  |
| Obr. 82 Chyby vyskytující se na rotační desce. ....                                           | 97  |
| Obr. 83 Schéma postupu měření rotační desky. ....                                             | 98  |
| Obr. 84 Měření svislého soustruhu s upnutým prstencem. ....                                   | 99  |
| Obr. 85 Princip rozmístění snímačů na rotační desce. ....                                     | 100 |
| Obr. 86 Modifikovaný způsob pro měření rotační desky.....                                     | 102 |
| Obr. 87 Měřicí trn svislého soustruhu. ....                                                   | 103 |
| Obr. 88 Schéma bezkontaktního snímače IN-081 [44]. ....                                       | 104 |
| Obr. 89 Požadavky pro nasazení bezkontaktního snímače IN-081 [44]. ....                       | 105 |
| Obr. 90 Kalibrace bezkontaktního snímače. ....                                                | 106 |
| Obr. 91 Princip uchycení snímačů v držáku IN-081. ....                                        | 106 |
| Obr. 92 Navržená jednotka pro měření rotační desky svislých soustruhů. ....                   | 107 |
| Obr. 93 Schéma optického snímače CNY70 [46]. ....                                             | 108 |
| Obr. 94 Aplikace měřicí jednotky na vertikální frézce FNG32. ....                             | 108 |
| Obr. 95 Výstupní signály pro S1, S2, opto z měření.....                                       | 109 |
| Obr. 96 Upravená data v Excel pro převod do MATLAB. ....                                      | 112 |
| Obr. 97 Upravená data pro jednu otáčku rotační desky. ....                                    | 113 |
| Obr. 98 Polární diagram z dat snímačů S1 a S2 v rovině 1.....                                 | 114 |
| Obr. 99 Posunutí středu Rm o Xs a Ys.....                                                     | 115 |
| Obr. 100 Polární diagram 1D1 a 1D2.....                                                       | 116 |
| Obr. 101 Neupravené odchylky osy X a Y. ....                                                  | 117 |
| Obr. 102 Odfiltrované odchylky od měření A. ....                                              | 118 |
| Obr. 103 Průběh natočení desky okolo osy X a Y. ....                                          | 119 |
| Obr. 104 Definování výsledné chyby svislého soustruhu. ....                                   | 120 |
| Obr. 105 Výsledné odchylky od ideálního bodu v souřadném systému rotační desky.<br>.....      | 121 |
| Obr. 106 Velikosti odchylek TCP při posuvu v ose X bez zatížení 1D.....                       | 122 |
| Obr. 107 Velikosti odchylek TCP při posuvu v ose X při zatížení 2D. ....                      | 123 |
| Obr. 108 Výsledná velikost odchylky v ose Y při z = 80 mm mezi TCP a obrobkem<br>při 1D. .... | 125 |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obr. 109 Výsledná velikost odchylky v ose Z při $z = 80$ mm mezi TCP a obrobkem při 1D. ....        | 126 |
| Obr. 110 Výsledná velikost odchylky v ose Y při $z = 360$ mm mezi TCP a obrobkem při 1D. ....       | 126 |
| Obr. 111 Výsledná velikost odchylky v ose Z při $z = 360$ mm mezi TCP a obrobkem při 1D. ....       | 127 |
| Obr. 112 Výsledná velikost odchylky v ose Y při $z = 760$ mm mezi TCP a obrobkem při 1D. ....       | 127 |
| Obr. 113 Výsledná velikost odchylky v ose Z při $z = 760$ mm mezi TCP a obrobkem při 1D. ....       | 128 |
| Obr. 114 Výsledná velikost odchylky v ose Y při $z = 80$ mm mezi TCP a obrobkem při 2D. ....        | 129 |
| Obr. 115 Výsledná velikost odchylky v ose Z při $z = 80$ mm mezi TCP a obrobkem při 2D. ....        | 130 |
| Obr. 116 Výsledná velikost odchylky v ose Y při $z = 360$ mm mezi TCP a obrobkem při 2D. ....       | 130 |
| Obr. 117 Výsledná velikost odchylky v ose Z při $z = 360$ mm mezi TCP a obrobkem při 2D. ....       | 131 |
| Obr. 118 Výsledná velikost odchylky v ose Y při $z = 760$ mm mezi TCP a obrobkem při 2D. ....       | 131 |
| Obr. 119 Výsledná velikost odchylky v ose Z při $z = 760$ mm mezi TCP a obrobkem při 2D. ....       | 132 |
| Obr. 120 Chování rotační desky. ....                                                                | 134 |
| Obr. 121 Návrh úpravy přípravku pro uchycení bezkontaktních snímačů. ....                           | 135 |
| Obr. 122 Modifikace měřicího trnu. ....                                                             | 136 |
| Obr. 123 Modifikace měřicí jednotky pro sledování velkých rotačních desek. ....                     | 137 |
| Obr. 124 Vývojový diagram pro předběžný návrh volby obráběcího centra dle požadavků zákazníka. .... | 142 |
| Obr. 125 Vývojový diagram návrhu metodiky měření a měřicí aparatury. ....                           | 143 |
| Obr. 126 Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [30]. ....                                      | 165 |
| Obr. 127 Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [31]. ....                                      | 167 |

**SEZNAM TABULEK**

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 1 Definované polohy příčnicku.....                                                    | 68  |
| Tab. 2 Velikost výsuvu smykadla pro polohu příčnicku .....                                 | 69  |
| Tab. 3 Linearizace naměřených hodnot pro definovanou polohu suportu.....                   | 90  |
| Tab. 4 Stanovení funkce pro popis pojezdu suportu při definované poloze smykadla.<br>..... | 93  |
| Tab. 5 Sledované chyby rotační desky svislých soustruhů. ....                              | 96  |
| Tab. 6 Dostupné bezkontaktní snímače.....                                                  | 104 |
| Tab. 7 Maximální a minimální odchylky pro vybraný pohyb TCP – 1D. ....                     | 128 |
| Tab. 8 Chyby na budoucím obrobku – 1D. ....                                                | 129 |
| Tab. 9 Maximální a minimální odchylky pro vybraný pohyb TCP – 2D. ....                     | 132 |
| Tab. 10 Tab. 8 Chyby na budoucím obrobku – 2D.....                                         | 132 |
| Tab. 11 Prvky pro stavbu měřicí jednotky. ....                                             | 139 |
| Tab. 12 Porovnání terminologie ČSN ISO 230-1 a DIN ISO 230-2 [30, 5].....                  | 166 |
| Tab. 13 Definice dle směrnice VDI\DGQ 3441 [31]. ....                                      | 168 |

## 1 ÚVOD

Třískové obrábění patří k nejrozšířenějším strojírenským technologiím, od kterého se odvíjí další technické směry ve strojírenství. Neustále se vyvíjející technika a technologie umožňují nasazení nejen nových technických prvků do obráběcích strojů, ale i metodik zpracovávající potřebné informace, kterými je zvyšována efektivita výroby a také povýšení technické úrovně samotného obráběcího stroje.

Obráběcí stroje prošly historickým vývojem jako každé jiné odvětví, kde hlavním cílem bylo a stále je zvyšování produktivity a zvyšování pracovní přesnosti strojů. Tento trend nadále trvá a pro obrábění nejpreciznějších součástí jsou nasazovány CNC obráběcí stroje, kde obrobek je obroben na minimálním počtu strojů a upnutí. Díky vývoji materiálů, pohonů, řízení a měřicí techniky, je možné neustále zvyšovat přesnost polohování jednotlivých částí stroje.

Dosažením kvalitní konstrukce jednotlivých dílů je docíleno vysoké geometrické přesnosti, která ovlivňuje výslednou pracovní přesnost obráběcího stroje. Na základě vypracovaných analýz v oblasti geometrické přesnosti i přesnosti polohování obráběcích center a shrnutím poznatků současné techniky bude v této práci sestaven systémový přístup pro predikci vybraných vlastností obráběcího stroje. Cíl je zaměřený na možnost určení již u výrobce, zda dojde na nabízeném stroji k obrobení zákazníkem určené součásti, či nikoliv. Tato skutečnost má velký vliv nejen na nabídkový proces a případný průchod zakázky firmou, ale může sloužit jako velmi silný nástroj pro zpětnou vazbu na konstrukci.

Úspěšné zpracování navržené metodiky je podporováno firmou TOSHULIN, a.s., kde byly provedeny příslušné měření a ověření výsledku na svislém soustruhu SKIQ30 (v.č. 1604). Právě požadavky z průmyslu na sestavení systémového přístupu (metody) predikce vybraných vlastností obráběcího stroje, kde výchozími parametry mají být specifické požadavky zákazníka na budoucí obrobek, je absence takovéto metody.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

NC obráběcí stroje se sériovou kinematikou jsou nejdůležitější součástí ve výrobě a současně nositelem high-technologií ve strojírenském průmyslu. Hnacím prvkem jsou požadavky od zákazníků na neustále vyšší dosahované přesnosti, jakosti obrobků a jakosti celé výroby. Důsledkem těchto požadavků je souvislý vývoj s cílem dosažení vyšší výrobní přesnosti, kterou z nemalé části ovlivňuje geometrická přesnost obráběcích strojů (dále jen OS). Ve výsledku se nejedná o nic jiného, než definovaně zajišťovat ideální polohu nástroje vůči obrobku s minimálními vzájemnými odchylkami.

Ve skutečnosti vzniká během obrábění nepřesnost, která je dána celkovou chybou nástroje vůči obrobku od vzájemné ideální polohy. Tato chyba je důsledkem nedokonalosti soustavy stroj-nástroj-obrobek a je možné ji minimalizovat vhodnými metodami. Pro aplikaci těchto metod, konstrukčních nebo pasivních či aktivních kompenzací je nezbytné odhalit a vhodně popsat příčiny vzniklé chyby. V celkové chybě stroje jsou promítnuty chyby geometrické přesnosti, chyby vzniklé tepelnou dilatací a chyby vyvolané silami od obrábění. Mezi další prvky ovlivňující vzájemnou polohu nástroje a obrobku jsou např. dynamická stabilita stroje (tuhost) vyvolaná nesouměrným záběrem destiček nástroje do obrobku, naladění pohonů a celkové řízení ovlivňující nejen dynamickou stabilitu vybuzenou silami od zrychlení a brždění částí strojů, ale také najetí do požadované polohy, atd. Nicméně geometrické chyby tvoří hlavní část nepřesnosti obráběcího stroje [1]. Problematikou zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů se zabývá nesčetné množství autorů, kteří se snaží kompenzovat vlivy od tepelného zatížení, geometrických odchylek a chyb vzniklých od řezných sil. Tímto tématem se zabýval Ramesh a kol. [2], přičemž klasifikovaly chyby na obráběcích strojích podrobněji. Geometrické chyby komponent a struktury obráběcího stroje, kinematické chyby, chyby vybuzené tepelným ovlivněním, chyby nestability materiálu, montážní chyby, chyby od geometrie nástrojů, chyby od přípravků, chyby vzniklé od servopohonů, chyby způsobené silami od obrábění, aj. Při tvorbě modelů popisujících geometrické chyby vychází autoři [1, ..., 20] převážně z dokonale tuhých os, přičemž jsou modelovány pomocí homogenních transformačních rovnic (HTM). Homogenní transformační rovnice je v třírozměrném prostoru jako matice  $4 \times 4$ , která bude v dalších kapitolách blíže popsána. Z provedené rešerše popisu obráběcího stroje a vyskytujících se chyb na něm lze aktuální výzkum v tomto směru rozdělit do následujících oblastí:

- Popis kinematické struktury
- Přístup měření a vyhodnocení
- Přístup ke kompenzačním metodám

### ***Popis kinematické struktury stroje***

Již na počátku řešení problematiky kompenzace nepřesností obráběcího stroje (OS) respektive souřadnicového měřicího stroje (Coordinate measuring machines - CMM) je nutné mít dobře definovanou kinematiku a geometrii zkoumaného stroje. Z toho mohou být dále odvozeny rovnice kinematiky jednotlivých částí stroje a dále seskupeny v jeden celek. Výsledná rovnice udává pohyb mezi polohou nástroje (tool center point - TCP) a pracovním prostorem, kde výsledkem jsou informace o vzniklých nepřesnostech právě v daném TCP. Autoři [1, 2, 4, ..., 21] popisují ve svých publikacích tří osé obráběcí stroje, 5-ti osé obráběcí stroje a CMM. Dále se zabývají jednotlivými částmi, jako jsou rotační stoly, kolíčky, lineární osy. V podstatě lze říci, že většina autorů definuje chybu v závislosti na aktuální poloze (souřadnicích) nástroje v pracovním prostoru. Demeč [22] se věnuje ve své publikaci přesnosti obráběcích strojů a jejich matematickému modelování, přičemž v matematickém modelu přepočítává polohu nástroje vůči obrobku pro předem definovanou technologii (z rychlosti posuvů, uložení a rozměrů obrobku). Do modelu obráběcího stroje zanáší definované chyby jednotlivých komponent stroje definované statickou tuhostí a ovlivněné silami od obrábění. Z výsledných údajů jsou získány odchylky na virtuálním obrobku. Stejným úkolem se zabývala Amrichová [23], která vytvořila matematický model pro horizontální soustruh EMCO PC TURN 50. Sestavené kinematické rovnice odpovídaly postupu autora [22].

V každém případě autoři definují zjednodušení výpočtového modelu, přičemž omezení se týkají především tuhostí jednotlivých těles (soustav).

### ***Přístup měření a vyhodnocení***

Přístup k problematice zadávání odchylek do geometrického (kinematického) modelu se zde liší právě od výše zmiňovaného přístupu sestrojování matematických rovnic. Zjišťování geometrických odchylek na obráběcím stroji, popř. CMM lze rozdělit podle použitého vybavení pro jejich měření. K experimentální části, kde jsou vyhodnoceny příslušné odchylky, byl použit v [1] mřížkový snímač KGM firmy HEIDENHAIN. V [4, 18, 24, 25] autoři využili zařízení na principu laserové interferometrie, UDDIN a Pahk [9, 26] zase nasadili pro získání potřebných odchylek systému double ball bar (DBB). IBARAKI [8] zase řešil problematiku přes zkušební obrobky, ze kterých přepočítával chyby na stroji. BRINGMANN [24] nasadil do pracovního prostoru 3D Ball plate, kde po provedené zkoušce definoval chyby v pracovním prostoru.

Z principu jednotlivých metod měření byly získány odlišnými matematickými úpravami a přepočty chyby v pracovním prostoru obráběcího stroje. Vždy se jednalo

o 21 odchylek, které se dále dosazují do patřičných modelů geometrie stroje. Jednotlivé modely obráběcích i CMM strojů jsou převážně postaveny na sestavení kinematiky stroje dle HTM.

### ***Přístup ke kompenzačním metodám***

Jak bylo již řečeno, hnacím motorem pro zvyšování pracovní přesnosti je nejen využití nejnovějších technologií při obrábění komponent budoucího stroje, ale také využívat nejmodernější matematické algoritmy. Využitím těchto algoritmů je možné jejich „učením“ dosahovat menších odchylek TCP od její ideální polohy. Autoři [19] využívají nejen standardní statistické metody, ale nasazují např. neuronové sítě, NURBS-based funkce, atd. Poslední dvě zmiňované aplikace jsou využívány a testovány pouze v laboratorních podmínkách. Tyto příklady aktivní kompenzace jsou založeny na nutnosti implementace příslušných snímačů do obráběcího stroje. Ať se jedná o kompenzaci tepelných ovlivnění, deformací způsobenou vlastní hmotností jednotlivých komponent obráběcího stroje, deformaci ovlivněnou hmotností obrobku a kompenzaci chyb vzniklých dynamickým chováním, je vždy nutné patřičným vybavením neustále kontrolovat sledované veličiny. Druhým typickým zástupcem, který výrobci obráběcích strojů hojně používají, je pasivní kompenzace. Pasivní kompenzace vychází ze znalostí statické deformace jednotlivých částí OS. Metoda je založená např. na předem definované deformovaném nosníku, který se vlivem působení vlastní hmotnosti nebo sil od obrábění přiblíží ideální poloze. Nevýhodou je, že při změně zatížení popř. změně okolních veličin ovlivňujících kompenzovaný parametr, není možné soustavu ovlivnit a minimalizovat vzniklou chybu.

Zde je vysoký potenciál u aktivních kompenzací sledovat větší množství parametrů a pomocí matematických algoritmů volit optimální podmínky k minimalizaci vzniklých chyb.

## **2.1 AKTUÁLNÍ STAV POZNÁNÍ PRACOVNÍ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍCH STROJŮ**

Jak bylo řečeno v úvodní kapitole, tak mezi jeden z důležitých faktorů táhnoucích vývoj obráběcích strojů je zvyšování jejich pracovní přesnosti, která je úzce spojena s jeho geometrickou přesností.

Výzkumná činnost v této oblasti je zaměřena především na optimalizaci konstrukčních řešení a nasazení aktivních kompenzací do OS. V dnešní době jsou tyto konstrukce koncepčně stavěny na požadavcích zákazníků. Z takového kritéria se výrobci strojů snaží o stavbu „jednoúčelových“ obráběcích strojů určených na konkrétní aplikaci. S tímto přístupem je možné rapidně zvýšit základní parametry stroje (přesnost, výkonnost, atd.), ale současně roste pořizovací cena stroje (případně

i provozní náklady), což může být pro zákazníka neakceptovatelné. V případě vývoje nové řady obráběcích strojů jde opět o kompromis mezi konstrukcí a požadavky zákazníků (rozšíření o opce stroje). Pořizovací cena stroje tím klesá, jelikož jsou pro stejné řady použity stejné nebo alespoň podobné komponenty. Oblast vývoje v konstrukční části je možné neustále vyvíjet a to především v použití nových materiálů nosných částí, využití přesnějších mechanismů k vyvození translačních i rotačních pohybů, uložení a mazání vzájemně se pohybujících komponent, aktivnímu odvodu tepla z nestabilních teplotních zón stroje, ustavení celého stroje, atd.

Druhou částí výzkumu výrobců OS i výzkumných institucí je použití aktivních kompenzací doplněné o příslušné algoritmy. Právě rozšiřování kompenzačních prvků (teplotní, geometrické, dynamické, atd.) mají vést ke zvyšování výsledné přesnosti obráběcích strojů. Nejedná se přitom pouze o minimalizaci chyb vzniklých mezi nástrojem a obrobkem, ale také o sledování stavu stroje. S implementací nejnovějších technologií do OS roste možnost vytvářet diagnostické systémy výrobních strojů.

Tento přístup zajišťuje výrobcí výrobního stroje neustále sledovat stav vyráběných strojů a současně porovnávat nově vyvíjené řady výrobních strojů. Dalším stěžejním přínosem je konkrétní volba stroje výrobcem dle požadavků zákazníka na kvalitu budoucího obrobku. Snížení času nutného pro stanovení nabídky je dalším přínosem výrobcí, který může rychle reagovat na požadavky zákazníka. V neposlední řadě jsou to ušetřené finance v průběhu stanovení nabídky volbou nejvhodnějšího stroje pro aplikaci vyžadovanou zákazníkem.

Současný stav poznání v oblasti zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů je převážně zaměřen na malé a střední CNC obráběcí stroje. Důvodem je především dostupnost těchto strojů s možností experimentálních ověření a tím spojenou finanční náročnost. Co se týče velkých CNC obráběcích strojů a jejich pracovní přesnosti, jsou tyto stroje v průběhu životního cyklu ovlivněny mnoha faktory (přesnost obrobení velkých komponent OS, deformace jednotlivých komponent a celé nosné soustavy od vlastní hmotnosti, velké statické i dynamické zatížení od velkých obrobků), které mohou být u malých a středních CNC OS zanedbány a tudíž nemusí být nijak blíže řešeny.

## 2.2 VYMEZENÍ POJMŮ

### 2.2.1 Geometrická přesnost OS

Tento pojem je definován autorem Zirnem [34], jako precizní kontrola pozice TCP, pod kterou spadá také koordinace více interpolovaných os stroje.



Weck [42] definuje geometrické odchylky obráběcího stroje jako veličinu ovlivněnou:

- Odchylkami od ideální geometrie nástroje
- Technologicky podmíněnými odchylkami (např. opotřebení)
- Elastickými deformacemi od nástroje, obrobku, přípravků a upínacích prvků
- Odchylkami strojních posuvů mezi definovaným posuvem a reálným posuvem nástroje a obrobku, a také zatěžujícími podmínkami od vlastních hmotností jednotlivých komponent stroje, tak jako odchylkami od translačních a rotačních pohybů daného procesu

Geometrickou přesností obráběcího stroje je chápána součinnost všech jeho komponent, přičemž jsou sledovány odchylky vzniklé mezi obrobkem a nástrojem.

V následujících odstavcích autor použil názvosloví *geometrické chování* obráběcího stroje. Pod tímto pojmem je možné představit si vzniklé geometrické odchylky na stroji, které negativně ovlivňují vzájemnou polohu mezi obrobkem a nástrojem. Mezi tyto negativně ovlivňující faktory lze počítat geometrickou přesnost jednotlivých částí stroje, kinematickou přesnost jednotlivých os, vybrané zatěžující a provozní podmínky vybraných komponent.

### 2.2.2 Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy

Udává odchylku mezi požadovanou polohou a průměrnou hodnotou skutečné polohy z různých směrů. Přesnost najetí do polohy se udává pro konkrétní bod. Obvykle je to referenční bod umístěný do středu pohyblivé plošiny.

### 2.2.3 Kinematická přesnost

Kinematické odchylky jsou definovány jako chyby vzniklé více na sobě závislých pohybových os (řezání závitů, řízení dráhy). Rozborem kinematických odchylek na jednotlivé elementy se dostaneme na chyby, které jsou definovány geometrickými odchylkami [42].

### 2.2.4 Predikce

V této práci bude pojem predikce, predikování, spojováno především s obráběcím strojem a obrobkem a jejich vlastnostmi.

Pojem predikce je definován z (lat. Prae, před, a dicere, říkat), tedy přeneseně předpověď, prognózu. Zde jsou tvrzení, které teprve nastanou opřené o vědeckou hypotézu nebo teorii. Výsledná tvrzení, která se budou zabývat jistými jevy, jsou dále zatížena do jisté míry nejistotami [33].

### 2.2.5 Nejistota měření

*„Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině. Jako měřené veličiny jsou označovány ty blíže určené veličiny, které jsou předmětem měření. Při kalibracích se obvykle pracuje pouze s jednou měřenou veličinou, resp. jednou výstupní veličinou  $Y$  závislou na určitém počtu vstupních veličiny  $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$  dle funkční závislosti“ [47].*

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1).$$

Při návrhu metodiky měření je nezbytné zahrnout do výsledků měření také nejistotu měření. Nejistota měření se stanoví postupem pro stanovení nejistoty typu A nebo postupem pro stanovení nejistoty typu B. Nejistota typu A je stanovena na základě provedených měření a sledování, ze kterých je vyhodnocena statistickou analýzou. Abychom mohli dále použít stanovení nejistoty typu A musí se provést několik měření prováděných za stejných podmínek. Pokud je měření prováděno s dostatečným rozlišením, bude možné pozorovat rozptyl naměřených hodnot [47].

Postup pro stanovení standardní nejistoty typu B je založen na stanovení nejistoty vztahující se k odhadu  $x_i$  vstupní veličiny  $X_i$  jiným způsobem, než statistickou metodou. Stanovení standardní nejistoty je založeno na odborném úsudku vztahujícím se ke všem dostupným informacím k danému měření [47].

V celém průběhu řešení dizertační práce bude pracováno s měřicí aparaturou, u které by bylo náročné a nákladné pořizovat kalibrační list s definovanou nejistotou měření. Pro návrh metodiky měření, který je cílem dizertační práce, nebude fyzicky počítáno s nejistotou měření, ale bude u každého přístroje brán v potaz, že musí disponovat touto veličinou.

### 2.2.6 Systémový postup, systémový přístup

Systémový postup je zobecněný algoritmus pro řešení problémů, respektující systémový přístup, vyžadující systémové myšlení a využívající systémové metody.

*„Systémový přístup je jedním z možných přístupů člověka k realizaci nejrůznějších činností, zejména těch, které jsou spojeny s různými druhy analýz objektů a procesů, které na nich probíhají, s poznávacími procesy, s řešením běžných i odborných problémů, ale i s činnostmi typu myšlení či jednání“ [12].*

### 3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

#### 3.1 MOTIVACE

Současný stav řešení problematiky v oblasti popisování chyb vzniklých v procesu obrábění byl získán podrobnou rešerší. Informace zpracované rešerše byly převážně čerpány ze zahraničních odborných publikací a časopisů (Precision Engineering, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Mechatronics, apod.), dále ze sborníků konferencí, komerčních materiálů a domácích odborných publikací. V níže uvedeném textu je předložena komplexní rešerše řešení problematiky. Výsledky rešerše ukázaly, že stav popisovaného tématu dizertační práce je v průmyslové praxi velmi málo nebo skoro vůbec řešen, a to na úrovni teoretické i experimentální. Pro ilustraci je zde věnována kapitola metodice posuzování geometrické přesnosti obráběcích strojů, především měřicí techniky a zpracování získaných hodnot. Současně tato partie zdůrazňuje motivaci řešení dizertační práce a její potenciál pro výrobce CNC obráběcích strojů, a to se zaměřením na velké CNC obráběcí stroje.

Motivací pro řešení této práce jsou následující body:

- snižování nákladů na vývoj nových strojů doplněním o databázi geometrického chování jednotlivých částí nových i stávajících svislých soustruhů
- doposud nebyl publikován žádný přístup k sledování stavu „geometrického chování“ svislých soustruhů a ověřování konstrukčních řešení
- využití nových technologií z oblasti výpočetní a měřicí techniky v procesu vývoje a kontroly obráběcích strojů
- zrychlení času pro identifikaci vhodného stroje a stanovení cenové nabídky dle specifikace zákazníka.

#### 3.2 DEFINICE PROBLÉMU

Pro zvýšení konkurenceschopnosti firem je nutné neustále nabízet zákazníkům služby, které uspokojí jejich rostoucí požadavky na výrobní stroje. Jedním z požadavků je doba ke stanovení ceny a dodací lhůty nového stroje.

Druhým požadavkem jsou neustále se zvyšující nároky na kvalitu obráběcího stroje po dobu jeho životního cyklu. Na tyto požadavky se bude soustředit dizertační práce, kde v řešení budou zpracovány právě problémy zaměřené na vybrané

vlastnosti obráběcího stroje a predikování vybraných vlastností budoucích obrobků vyrobených na svislém soustruhu.

Řešením těchto klíčových bodů se podpoří zrychlení procesu pro dobu ocenění i dodání nového stroje. Současně budou získané informace dále využity pro zpětnou vazbu při vývoj nových strojů, popř. jejich konstrukčních uzlů.

### **3.3 CÍLE ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE**

Cílem této práce je navrhnout metodiku měření, ze které bude možno predikovat vlastnosti budoucího obrobku v závislosti na vybraném obráběcím stroji. Z dostupných norem, metodik a nových technologií určených pro kontrolu obráběcích strojů bude sestavena nová metodika, určená k predikci budoucího obrobku a vybraných vlastností obráběcího stroje. Součástí je i zohlednění faktorů, které mohou navrženou metodiku negativně ovlivnit. Jelikož není možné sestavit metodiku, která by byla schopná zohlednit všechny faktory ovlivňující výslednou přesnost budoucího obrobku, bude nutné vybrat takové veličiny, které budou schopny vypovědět co nejvyšší mírou o budoucích geometrických vlastnostech obrobku. Ve stejném smyslu bude metodika zohledňovat i ekonomické hledisko a to v náročnosti na technické vybavení a vynaloženého času k získání potřebných informací.

### **3.4 OČEKÁVANÝ PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE**

Vyvíjená metodika měření umožní výrobcí získat důležité informace o chování stroje, které jsou nezbytné pro vybrání vhodné varianty stroje, způsobilého splnit požadavky zákazníka týkající se přesnosti obrobení budoucího obrobku. Výrobce tak bude moci rychlejší a jednodušším způsobem stanovit cenovou nabídku dle specifikací zákazníka.

Výstupy navrhované metodiky dále umožní výrobcí odhalit „slabá místa“ obráběcího stroje a efektivněji se zaměřit na další vývojové činnosti v oblasti konstrukce jednotlivých částí stroje a implementace nových technologií (aktivní kompenzace, online diagnostika) do stroje.

V neposlední řadě vyvíjená metodika umožní výrobcí lépe splňovat požadavky zákazníků a tím se rovněž podpoří jeho konkurenceschopnost.

### **3.5 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE**

Předložená práce je zpracována tak, že bude nejdříve představen zkušební stroj, který je vybrán z výrobního spektra firmy TOSHULIN, a.s. Pro vybraný svislý soustruh se sestaví metodika měření, a budou na něm prováděny veškeré

experimentální zkoušky. V následující kapitole bude naznačen základní princip nové metodiky měření a současně představeny požadavky na hledané vlastnosti zkušebního stroje, včetně budoucího obrobku. Na základě těchto požadavků se sestaví princip pro získávání hledaných parametrů ze zkušebního stroje. Současně probíhá rešerše s aktuálními trendy měření, jsou vytipovány vhodné přístroje pro měření a představeny principy získávání hledaných veličin.

V návaznosti je popsáno jak teoretické zpracování návrhu měření pro svislé soustruhy, tak vytipování technického vybavení k jeho úspěšné realizaci.

Navržené měření je experimentálně ověřeno na testovaném stroji a podrobně popsáno. Zpracované informace budou sloužit jako vstupní hodnoty do navržené metodiky. Další část práce je věnována modifikaci navrženého principu měření svislých soustruhů a doporučeních pro další zpracování a aplikace metodiky.

## 4 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PŘI NÁVRHU TECHNICKÉ SOUSTAVY

Cílem dizertační práce je navrhnout metodiku měření a příslušnou měřicí aparaturu, ke které se budeme snažit dojít za pomoci systémového přístupu.

Návrh koncepce měřicí jednotky a metodiky měření bude respektovat následující požadavky. Rozdělení požadavků vychází z [28]:

- Funkce a funkční parametry
  - Vycházející z požadavků na provoz svislých soustruhů
  - Snadná montáž na svislý soustruh
  - Záznam z rozsahu otáček 1-600 1/min
  - Rozlišení snímače lepší 1  $\mu\text{m}$
  - Minimální hmotnost měřicí jednotky
  - Jasně a zřetelně vyhodnocení sledovaných parametrů
- Provoz
  - Minimální údržba
  - Bezpečná manipulace při montáži a během zkoušek na stroji
  - Měřicí jednotka nesmí být ovlivněna elektronikou svislého soustruhu
- Design
  - Uspokojivý design
  - Ergonomický pro snadnou manipulaci
- Výroba
  - Maximální možná jednoduchost konstrukce měřicí jednotky při dodržení funkce a funkčních parametrů
- Ekonomie
  - Minimální pořizovací náklady a náklady na provoz

## 4.1 SOUSTAVA A SYSTÉM

### 4.1.1 Prvek a soustava

Jednou ze základních vlastností objektů je strukturovanost, tzn. soubor prvků, vztahů a interakcí mezi nimi a okolím. S tímto pojmem souvisí následující pojmy [55, 56]:

- Soustava

Je reálný, nebo abstraktní objekt se systémovými vlastnostmi, který může být vyšetřován na příslušné rozlišovací úrovni. Může být také vytvářen jako soubor částí soustavy s příslušnými vzájemnými vazbami a probíhajícími interakcemi.

- Prvek soustavy

Je každá její část, která je vymežitelná na příslušné rozlišovací úrovni, na této úrovni tvoří celek.

Pokud mají prvky tvořit soustavu, musí být propojeny vzájemnými vazbami, které popisují vzájemné interakce. V dizertační práci bude soustava charakteru – soustava technická mající vlastnosti:

- Vnější (provoz, funkce, vztah k obsluze)
- Vnitřní (struktura prvků, uspořádání prvků, tvar, ...)

### 4.1.2 Systém

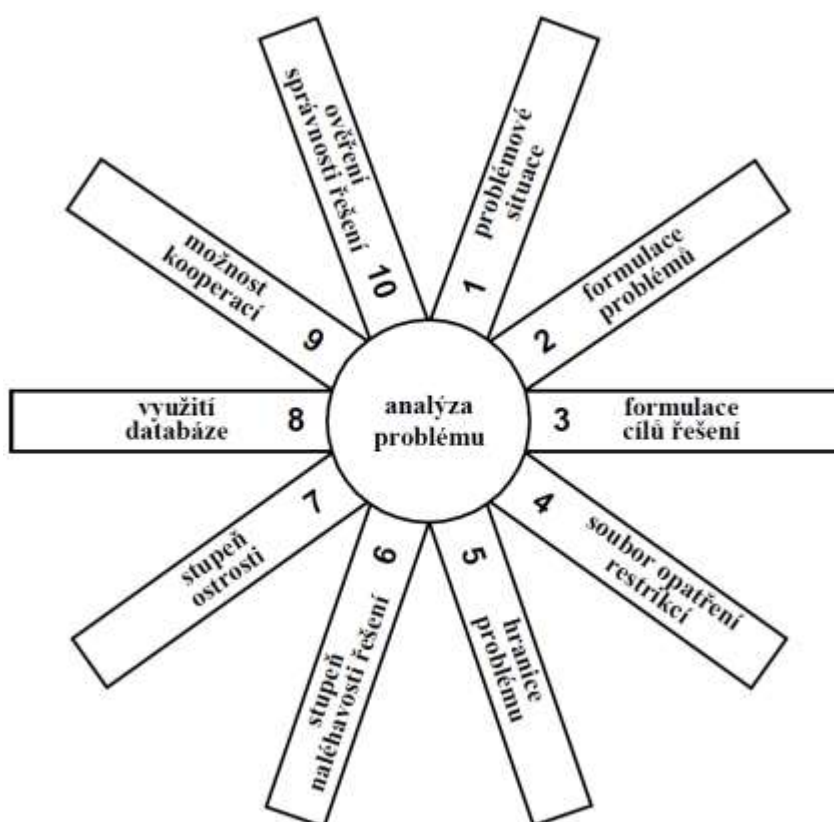
V běžné řeči, ale i strojírenské praxi se pojem systém používá jako synonymum s pojmem soustava (např. pružný výrobní systém). Systém je abstraktní objekt se systémovými vlastnostmi, účelně vytvořený ve vědomí lidí s cílem řešit konkrétní problém [55, 56].

## 4.2 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP

Systémový přístup je nástroj vědeckého i praktického poznání, přispívající k efektivní realizaci poznávacích procesů a tím i k řešení problémových situací na strukturně a procesně složitých entitách, nezávisle na jejich oborových podstatách [57].

Systémový přístup je takový tvůrčí způsob a proces myšlení, aplikovaný na lidské činnosti spojené s řešením problémů, který respektuje charakteristické systémové znaky, které lze formulovat dle následujících bodů [58]:

1. *Obsahově správné vymezení pojmů* týkajících se objektů, procesů, jevů apod., vyskytujících se v činnostech, na něž se aplikuje systémový přístup, např. v řešení určitých problémů.
2. *Prioritu má analýza problémové situace a problému*, zejména z následujících hledisek: definice problému a jeho vytyčených cílů, vymezení hranic problému a následujících analýz – soubor omezení, naléhavosti řešení, stupňů ostroty, využití databází, použitelných metod řešení, možností kooperací a verifikačních možností pro ověření správnosti řešení (viz. Obr. 1):



Obr. 1 Analýza problému [59].

3. *Objekty a na nich probíhající procesy* jsou chápány strukturovaně, tedy jako soubory prvků, vazeb mezi nimi a interakcí probíhajících na vazbách.
4. *Objekty jsou posuzovány účelově* – při výběru prvků struktur objektů, jejich vlastností, působení na objekt a jeho chování, z nichž se pak

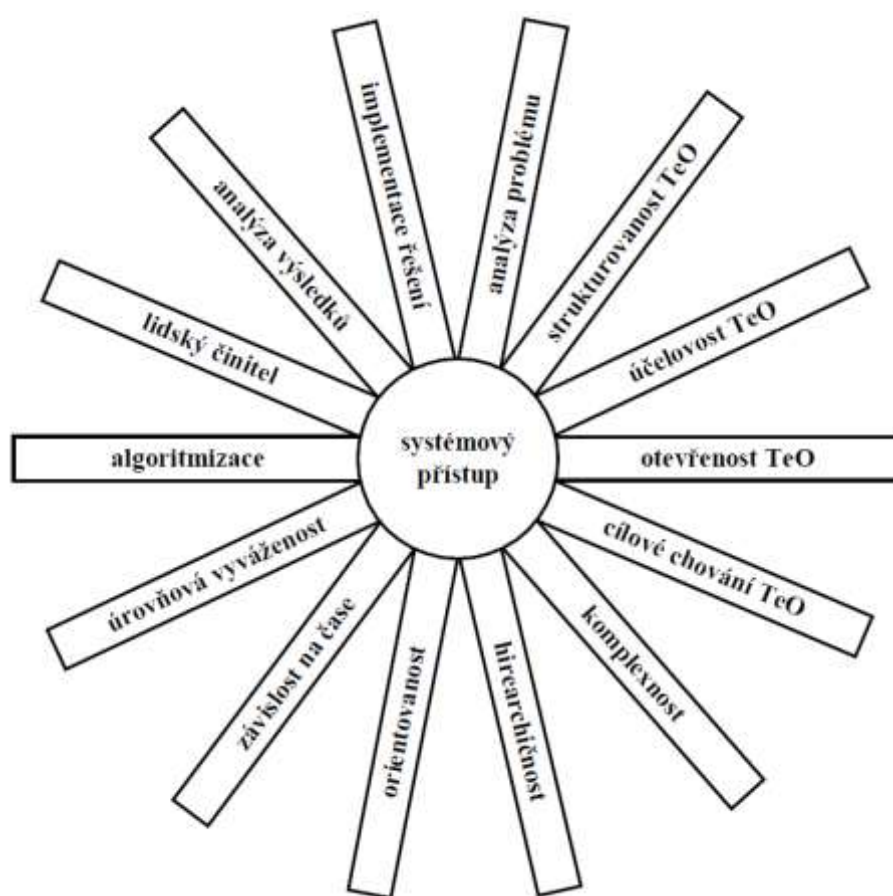


- vytváří systém na objektu, je zásadní posuzování jejich podstatnosti z hlediska řešeného problému.
5. *Objekty se vyšetřují jako otevřené soustavy*, u nichž existují vazby a interakce s okolím. Jejich podstatnost se analyzuje na potřebné a efektivní rozlišovací úrovni ve vztahu k řešenému problému.
  6. *Sleduje se cílové chování objektů* - jednání či řešení problémů se realizuje a posuzuje z hlediska cílů hierarchicky nadřazené struktury (zadavatel, uživatel).
  7. *Problémy jsou chápány a řešeny komplexně* - upřednostňuje se interdisciplinární přístup k řešení problémů v podobě mezioborové spolupráce a týmového charakteru řešení problémů.
  8. *Objekty jsou chápány hierarchicky* - z hlediska řešeného problému se vytváří hierarchie důležitosti zejména z hlediska působení na objekt, prvků a vazeb ve struktuře objektu, vlastností jednotlivých prvků a vazeb, jednotlivých projevů objektu, to vše s příslušnou klasifikací a kvantifikací parametrů.
  9. *Objekty se vyšetřují orientovaně* - tzn., že se vědomě sledují relace příčina – následek, vstup – výstup, dílčí řešení – nadřazené řešení apod.
  10. *Objekty se vyjadřují jako soustavy závislé na čase* - v pojetí teorie systémů „dynamicky“. Jako časově proměnné se uvažují podmínky, v nichž se problém řeší, cíle řešení, působení na objekt, ale také parametry objektu, které je potřeba zajistit takovým způsobem, aby měly úroveň a kvalitu, která bude požadována v době, kdy bude problém vyřešen, resp. objekt realizován.
  11. V jednáních a řešeních problémů se musí sledovat *úrovňová vyváženost*, což znamená, že přístupy k řešení dílčích problémů, použité metody řešení, výpočetní, technické a měřicí prvky, apod., by měly mít efektivní úroveň. Převyšuje-li úroveň jednoho prvku úroveň ostatních prvků, je to zbytečný přepych s různými důsledky, např. finančními. Nízká úroveň některého z prvků zase může znehodnotit úroveň řešení problému.
  12. Vytvářejí se *podmínky pro tvorbu algoritmů činností*, které by měly mít prvky hromadnosti a zobecnění. Tím by se mělo dosáhnout, že výsledek řešení bude méně závislý na jednání jedince a zobecněný přístup bude aplikovaný pro řešení obdobných problémů.
  13. Zdůrazňuje se *nenahraditelnost lidského činitele* při řešení nestandardních situací, dále efektivnost a progresivnost jeho heuristických činností, asertivita řešitele, atd.

14. *Proces myšlení, jednání či řešení problému by měl být zakončen analýzou a ověřením dosažených řešení.*

15. Závěrečnou fází je implementace řešení, tj. včlenění do konkrétních podmínek, v nichž má být řešení použito a realizace řešení.

Grafické znázornění základních systémových atributů je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 2 Systémový přístup [59].

### 4.3 STRUKTURA TECHNICKÉ SOUSTAVY

Technickou strukturou rozumíme obecnou množinu prvků a jejich vztahů tvořící určitý celek. Obecné schéma technické soustavy je znázorněno na (Obr. 3).

Podle typů prvků rozlišujeme strukturu [28]:

1. Funkční

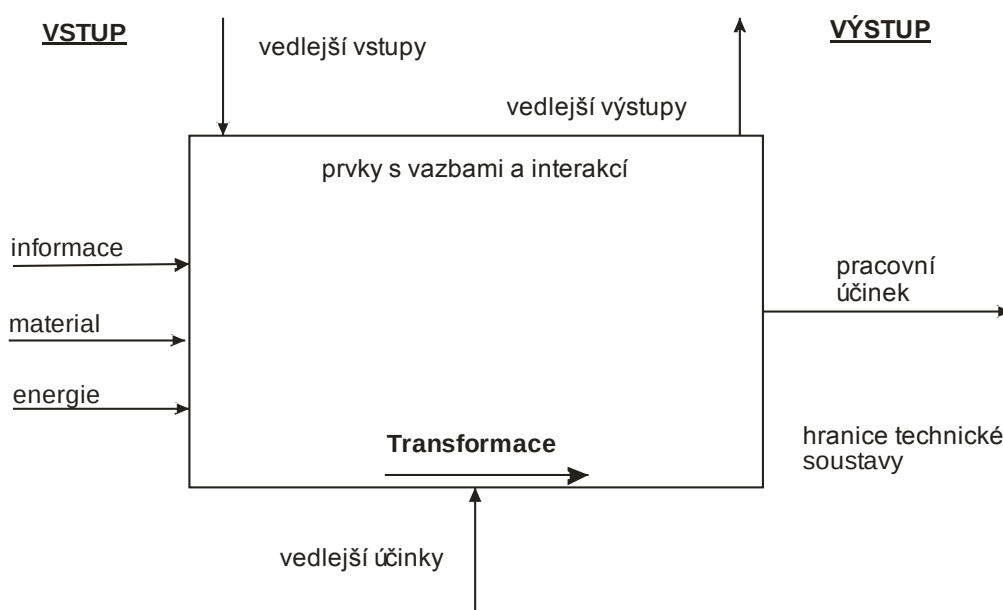
- prvkem je takový abstraktní objekt, aby byl beze zbytku pomocí transformačních funkcí proveden plánovaný účinek.

## 2. Prvkovou

- prvkem je základní stavební mechanismus jednotky, který optimálně realizuje funkční strukturu technické soustavy.

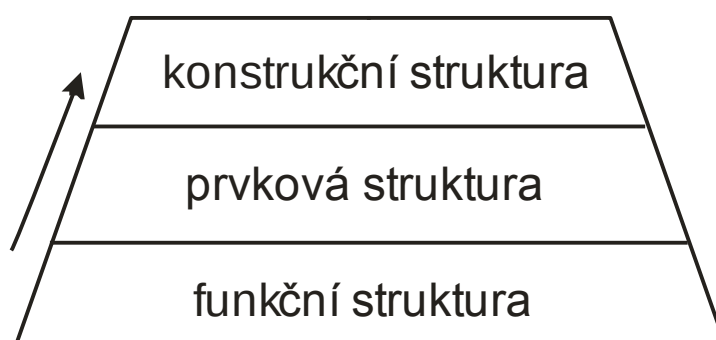
## 3. Konstrukční

- Prvkem je stavební skupina, provádějící plánované účinky.



Obr. 3 Obecné schéma technické soustavy [28].

Tyto typy struktur jsou uspořádány hierarchicky (Obr. 4) a u vlastního systémového přístupu při řešení problému je nutné postupovat od funkční, přes prvkovou ke konstrukční struktuře.



Obr. 4 Hierarchické uspořádání systémového přístupu [28].

## 4.4 ALGORITMUS SYSTÉMOVÉHO PŘÍSTUPU DLE MARKA [28]

### 4.4.1 Specifikace struktur technické soustavy

Jednotlivé struktury technické soustavy budeme blíže specifikovat, poněvadž je to nutné k sestavení algoritmu systémového přístupu. Pomocí systémového přístupu dojdeme postupně k nové kvalitě řešení (např. konstrukčního problému).

#### 1. Funkční struktura

- popis abstraktního objektu
- určení technického procesu
- rozdělení transformačních účinků na člověka a soustavu
- zobrazení funkční struktury

#### 2. Prvková struktura

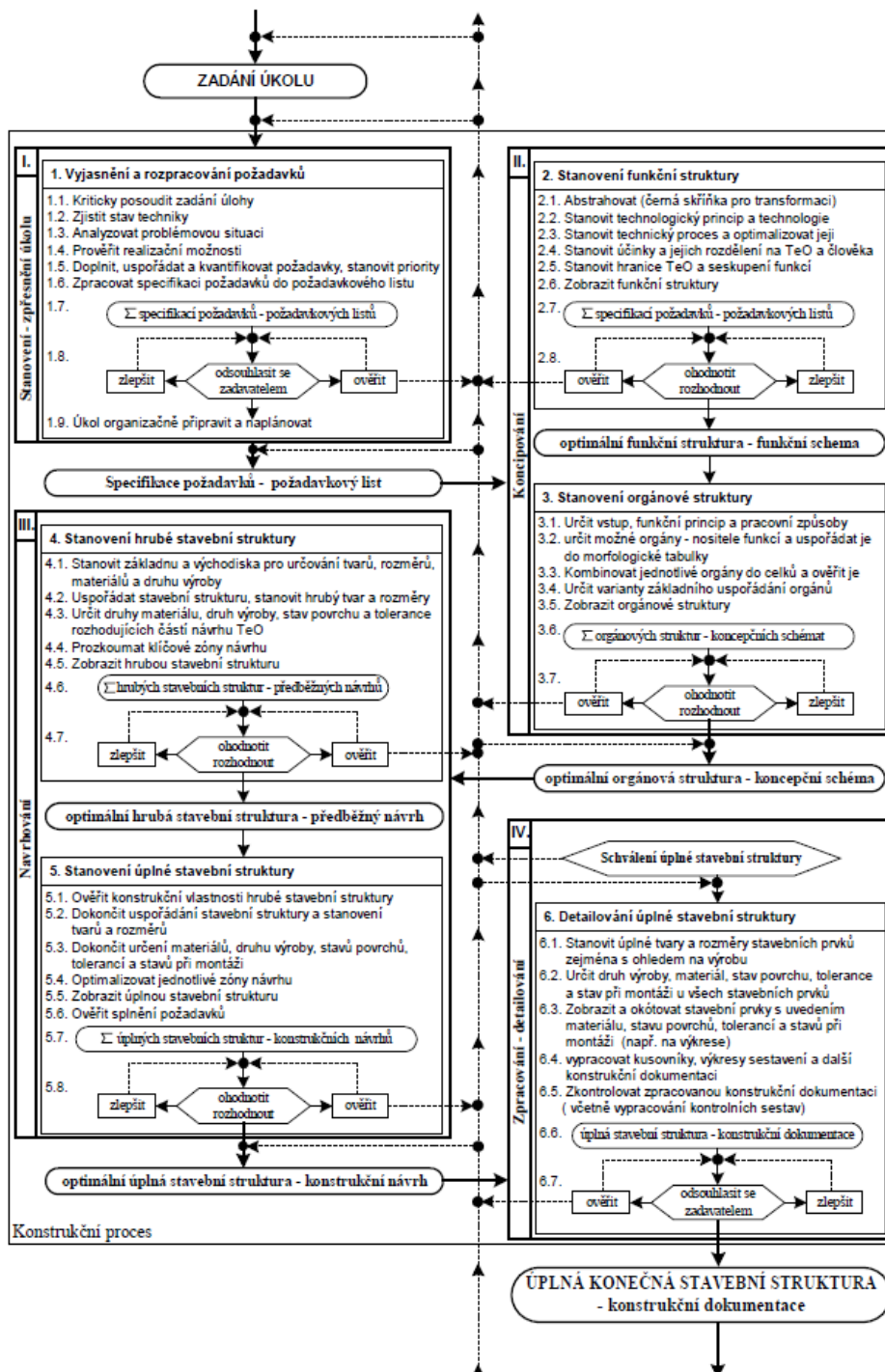
- vytipování možných prvků
- kombinace prvků do celků
- stanovení variant základního uspořádání prvků
- zobrazení prvkové struktury
- určení optimální prvkové struktury

#### 3. Konstrukční struktura

- podmínky pro určení tvarů, rozměrů
- uspořádání konstrukční struktury, stanovení hrubého tvaru a rozměru
- posouzení primárních vlastností návrhu
- zobrazení hrubé konstrukční struktury
- prověření vlastností hrubé konstrukční struktury
- dokončení uspořádání konstrukční struktury
- zobrazení úplné konstrukční struktury
- ověření splnění zadání

#### 4.4.2 Zobrazení algoritmu systémového přístupu při návrhu technické soustavy

Hierarchické uspořádání struktury technické soustavy je možné znázornit v grafické podobě (Obr. 5).



Obr. 5 Obecný model postupu konstruování technického objektu [61].

V následujících kapitolách bude přístupováno k návrhu nové metodiky měření a měřicí jednotky dle výše popsanych algoritmů.

## 5 TESTOVANÝ STROJ

### 5.1 POPIS STROJE

Za testovaný stroj (demonstrátor) byl zvolen svislý soustruh z produkce firmy TOSHULIN, a.s. Výrobní program firmy TOSHULIN se skládá z osmi výrobních a osmi velikostních řad (viz. Obr. 9). Zvolený demonstrátor spadá do výrobní řady SKIQ velikosti 30 (SKIQ30) a byl zvolen z následujících důvodů:

- Velikostně odpovídá vyšší řadě vyráběné firmou TOSHULIN, což vyhovuje zadání dizertační práce zabývající se velkými CNC obráběcími stroji
- Svislý soustruh SKIQ30, v.č. 1604 byl k dispozici po celou dobu plánovaného měření

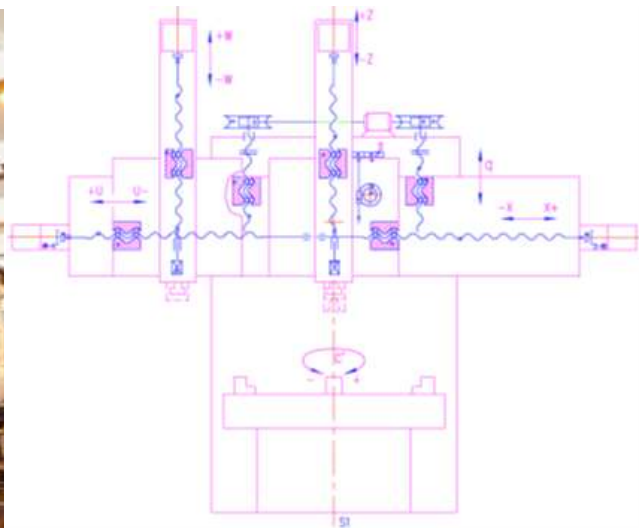
Mezi základní parametry vybraného stroje patří průměr upínací desky stroje o velikosti 3 000 mm, nosnosti 30 000 kg a maximálních otáčkách 200 ot/min. Svislý soustruh je osazen dvěma smykadly, z nichž jedno umožňuje rotační náhon nástrojů pro plnohodnotné obrábění v součinnosti s C-osu svislého soustruhu. Velikost pracovního prostoru stroje je dána velikostí posuvu jednotlivých pracovních os:

- a. Pojezdová osa pravého příčnickového suportu od středu desky  $X = 2\,250\text{ mm}$
- b. Pojezdová osa levého příčnickového suportu od středu desky  $U = 2\,250\text{ mm}$
- c. Pojezdová osa pravého smykadla  $Z = 1\,000\text{ mm}$
- d. Pojezdová osa levého smykadla  $W = 1\,060\text{ mm}$
- e. Pojezdová osa příčnicku  $q = 1\,000\text{ mm}$

Další parametry testovaného stroje:

- f. Maximální průměr obvodového soustružení – 3 600 mm
- g. Maximální průměr čelního soustružení – 3 600 mm
- h. Minimální míra přiblížení os smykadel pravého a levého příčnickového suportu – 1 432 mm
- i. Maximální průměr obrobku – 3 600 mm
- j. Maximální výška obrobku – 1 340 mm
- k. Maximální hmotnost obrobku – v závislosti na zadaných otáčkách upínací desky a vyosení obrobku – 30 000 kg
- l. Maximální zdvih příčnicku – 1 000 mm

- m. Průměr upínací desky – 3 000 mm
- n. Pracovní posuv (soustružnický režim) – 1 - 4 000 mm/min<sup>2</sup>
- o. Rychloposuv – 12 000 mm/min
- p. Maximální krouticí moment na vřetenu rotačních nástrojů – 1 129 Nm
- q. Maximální krouticí moment na upínací desce – 8 650 Nm



Obr. 6 Svislý soustruh SKIQ30 a jeho kinematické schéma [29].

## 5.2 KINEMATIKA STROJE

Zkušební stroj můžeme rozdělit na dvě části, které mohou pracovat z pohledu spřažených pohybů odděleně, anebo souběžně. Jestli-že budeme pracovat v režimu soustružení vnějších a vnitřních ploch bude rotační deska pracovat v režimu bez C-osy, bez nutnosti polohovat tuto osu a koordinovat ji s pohybem nástroje. Může tedy obrábět levé i pravé smykadlo současně, popř. pouze jedno. Levé smykadlo, které vykonává dle schématu na Obr. 6 pohyb W, je uloženo v suptu s pohybem označeným U. Do tohoto smykadla s nástrojovou hlavou, jdou upnout pouze nástroje pro soustružení. Pravé smykadlo s posuvem značeným Z je uloženo v suptu s pohybem X. Tato část stroje disponuje možností obrábění rotačními nástroji a při tomto obrábění je rotační osa v režimu C-osy. Jsou zde souběžně řízeny C-osa, Z a X osy. Z hlediska přestavení příčnicku označeného osou q, je jeho poloha přednastavená vzhledem k obrobku a potřebným výsuvům os W a Z. Poloha q je volena tak, aby bylo vyložení během celého obrábění co nejmenší. Poloha příčnicku je volitelná s krokem 100mm a jednotlivé polohy jsou značeny čísla 57-61. Jednotlivé polohy budou blíže popsány při návrhu měření v následujících kapitolách.

Osy U, W, X, Z i q jsou poháněny mechanismy se servopohony s kuličkovými šrouby. Rozsahy jednotlivých posuvů byly definovány pro svislý soustruh SKIQ30 v předchozí kapitole 4.1. Z těchto parametrů demonstrátoru budou dále voleny rozsahy pracovních posuvů pro experimentální ověření jeho vlastností.



## 6 NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ

### 6.1 ROZBOR PROBLEMATIKY

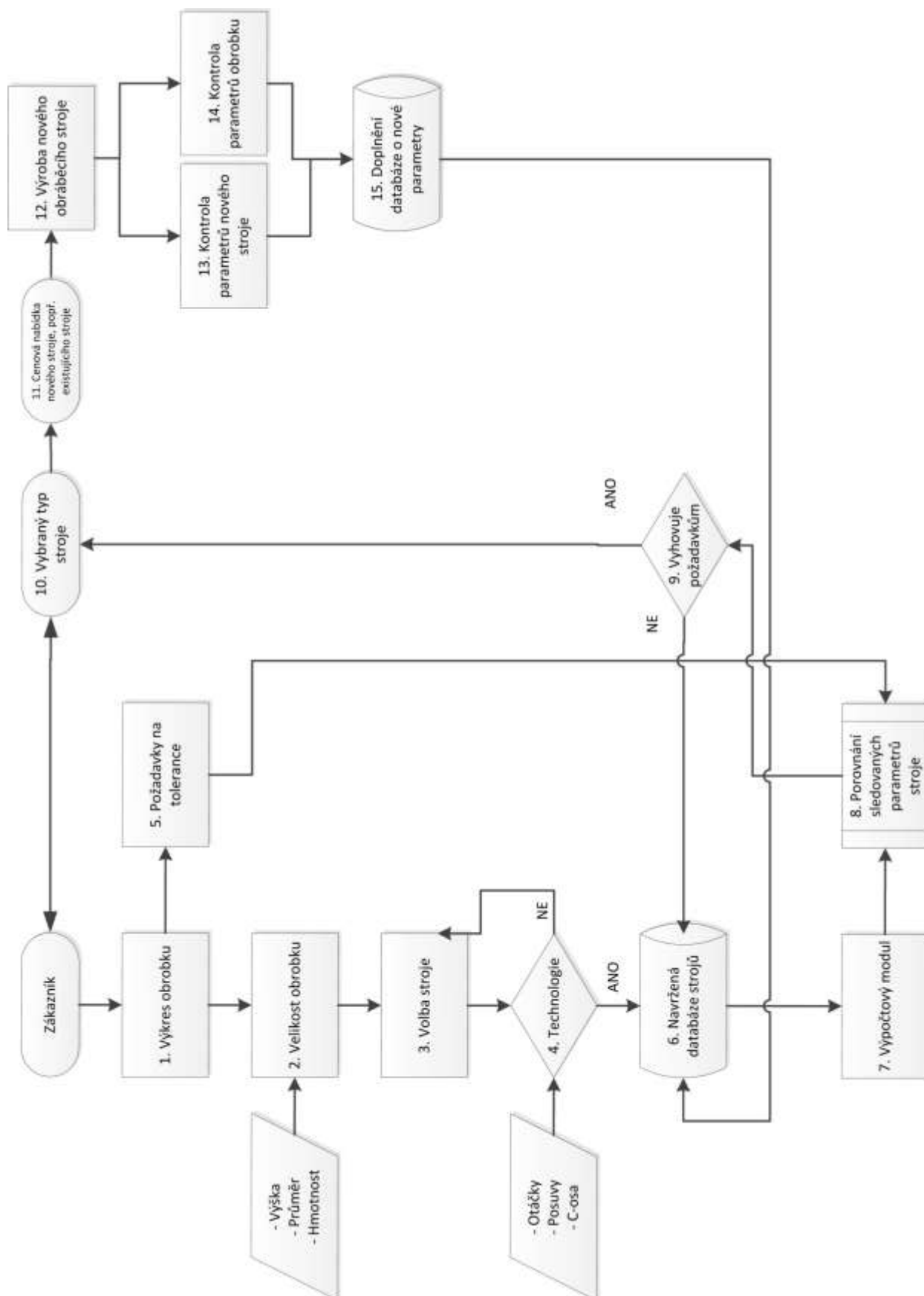
#### *Cíl, požadavky na stanovení cílů*

Z požadavků kladených na cíle dizertační práce vznikly dílčí požadavky na zajištění příslušných vlastností svislých soustruhů. Pro predikování chování svislého soustruhu a stanovení vlastností budoucího obrobku, které jsou ovlivněny vybranými faktory, bude sestaven příslušný model, sloužící ke srovnání a hodnocení jednotlivých svislých soustruhů. Mezi vybrané faktory ovlivňující výsledné chování stroje patří geometrická přesnost lineárních os, geometrická přesnost rotační osy, přesnost najetí do polohy všech řízených os, technologické podmínky (otáčky rotační desky, zatížení rotační desky, dokončovací operace). Nebudou zde řešeny chyby vzniklé silami od obrábění, chyby vzniklé dynamickým chováním jednotlivých os a stroje jako celku, tepelně ovlivněná soustava stroj-nástroj-obrobek, chyby vzniklé řízením, od upínacích sil, od upnutí obrobků atd. I přes to, že chyby vzniklé silami od obrábění a tepelným ovlivněním nebudou dále řešeny, bude rozebrána myšlenka pro implementaci těchto chyb do připravovaného modelu.

Dalším důležitým předpokladem je ověření na reálném stroji (zkušebním stroji). Vzhledem k finanční, časové náročnosti na experiment a výrobním možnostem firmy TOSHULIN, není možné proměřit, vyhodnotit a porovnat několik strojů stejné výrobní řady a velikosti. Vzhledem k tomuto aspektu bude v práci naznačen přístup pro další zpracování predikování vlastností svislých soustruhů a jejich vhodnou volbu pro konkrétní obrobek. Jelikož tato práce je zaměřena na problematiku velkých obráběcích centrech, u kterých nebylo možné vyhledat publikace v odborné literatuře, je zde velký potenciál pro návrh nového přístupu sledování vybraných částí těchto strojů.

V následujícím vývojovém diagramu je blíže popsán předběžný návrh kroků pro zpracování vytyčených cílů dizertační práce. Zpracování metodiky již zahrnuje body, mezi které patří požadavky budoucího zákazníka, strukturu pro identifikaci chyb svislého soustruhu a zpětnou kontrolu, jakožto vazbu pro zvyšování kvality predikovaných vlastností nově vyrobených strojů. Tyto kroky jsou potom blíže specifikovány v textu doplňující vývojový diagram navrhované metodiky.

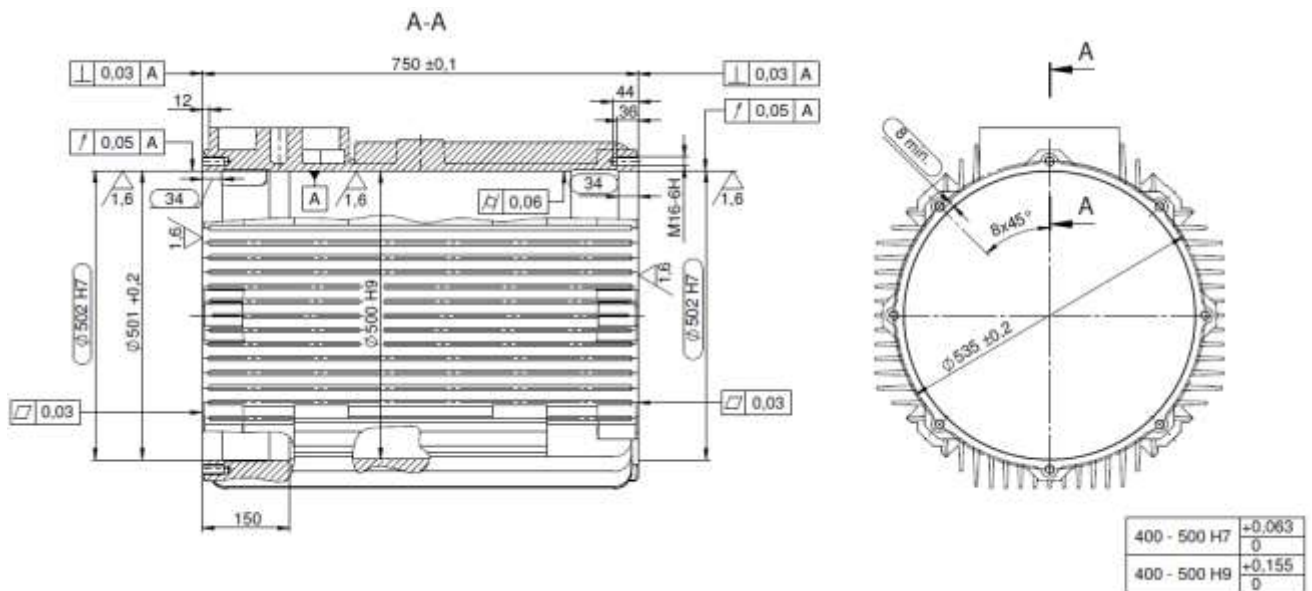
# Vliv geometrické přesnosti vybraných obráběcích center na požadované vlastnosti výrobků



Obr. 7 Vývojový diagram pro předběžný návrh volby obráběcího centra dle požadavků zákazníka

## 1. Výkres obrobku

Výkres budoucího obrobku je definovaný ze strany zákazníka. Z výkresu musí být vybrány všechny potřebné parametry, které budou následně zpracovány a vyhodnoceny. Dá se předpokládat, že vytipování takovýchto parametrů bude velmi záležet na zkušenostech pracovníků získaných aplikacemi navržené metodiky.



Obr. 8 Výkres budoucího obrobku [29].

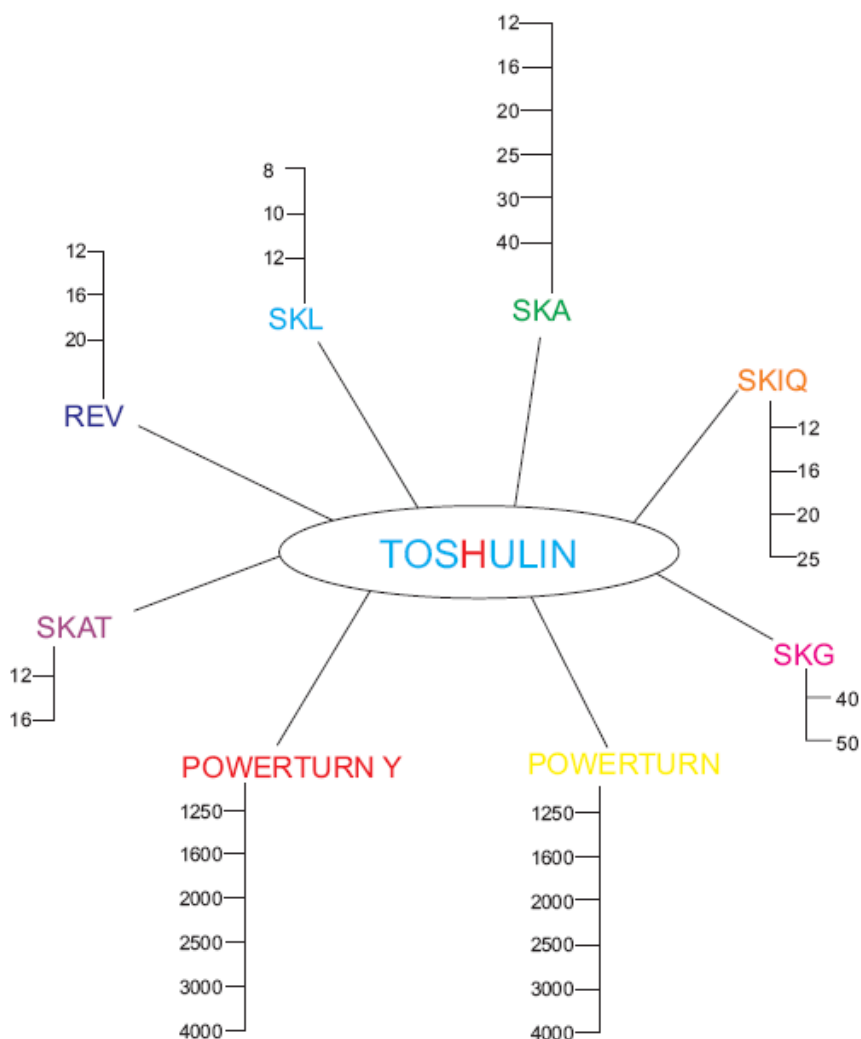
## 2. Velikost obrobku

Velikost obrobku je dána maximálním průměrem, výškou a hmotností obrobku.

- Výška  $h = 750$  mm
- Průměr  $D = 535$  mm
- Hmotnost  $m_{\max} = 257$  kg

## 3. Volba stroje

Velikostní řady jsou u výrobce TOSHULIN odstupňovány podle průměru upínací desky svislého soustruhu. Na Obr. 9 jsou znázorněny produktové řady a jejich vyráběné velikostní řady. Na základě předchozího kroku již mohou být předběžně vytipovány použitelné stroje.



Obr. 9 Výrobní program TOSHULIN

#### 4. Technologie

Dalším důležitým parametrem při volbě stroje na požadovaný typ obrobku je požadavek na použité technologie pro obrábění. Z hlediska ovlivňujících parametrů na výslednou geometrickou přesnost jsou brány v ohled požadovaný rozsah otáček, stroj určený pouze pro soustružnické operace nebo využívající i nástroje rotační a rozsahy posuvů. Na stanovených technologických požadavcích mohou být vytipovány produktové řady svislých soustruhů.

#### 5. Požadavky na tolerance stroje

Tento bod má sloužit k urychlení zpracování potřebných dat o stroji. Zjednodušení se týká hlavně procesu „modelování“ obráběcího centra a následnému procesu predikce jeho vybraných vlastností. Volba porovnávaných geometrických

úchylek bude minimalizována na základě testovaných strojů a postupně získaných zkušeností.

## 6. Navržená databáze strojů

V tomto bodě budou stanoveny požadované parametry obráběcího centra (svislého soustruhu), které jsou potřebné pro správné zpracování celé metodiky predikování vlastností obráběcího centra, a které budou uchovávány v příslušné databázi. Současně se budou do databáze doplňovat údaje o nově vyrobených obráběcích centrech. Stálým rozšiřováním databáze o informace z nově vyrobených strojů by se měla zvyšovat kvalita predikovaných vlastností.

## 7. Výpočtový modul

Výpočtový algoritmus zpracovává údaje z již dříve vyrobených obráběcích strojů, které odpovídají všem předchozím požadavkům. Výsledkem jsou informace o budoucích dosažitelných geometrických úchylnkách na zvoleném stroji. Tento výpočtový modul tvoří nosnou část celé metodiky. Jsou zde současně zahrnuty požadavky na měření a zpracování informací o stroji.

Výpočtový modul definuje veškeré požadavky na plánování a zpracování celého navrženého procesu. Vychází z požadavků na kontrolované parametry, jsou v něm definované hledané parametry a jejich zajištění v navrhovaném procesu. Základem je správné pochopení a definování problémů, ze kterého jsou stanoveny požadavky na měření obráběcího centra.

Myšlenka zpracování tohoto problému na principu definování ideálního a skutečného pracovního prostoru vznikla na základě možnosti využít měřicího vybavení Laser tracker API T3. Zavedením tohoto systému do procesu měření je možné vytvořit 3D síť prvků, ze kterých jsou dále získávány potřebné informace o chování stroje. V našem případě sledovat polohu nástroje vůči obrobku a určit tak hledanou relativní odchylku. Tento krok bylo možné využít pouze pro translační pohyby svislého soustruhu. Pro získání potřebných informací o rotační desce svislého soustruhu, na které je ustaven budoucí obrobek, bylo nutné vyvinout přístup k měření a jeho zpracování. V poslední části výpočtového modulu musí dojít ke skloubení chyb vzniklých z rotačního pohybu a z pohybů translačních.

## 8. Porovnání sledovaných parametrů obráběcího stroje

Z předchozího zpracování budou informace o dosažitelných geometrických odchylkách stroje srovnány s požadavky na tolerance obrobku zadané zákazníkem. Na základě těchto výsledků by se měl výrobce rozhodnout o budoucí cenové

nabídce na stroj, která tak může být pro výrobce zjednodušena a rychleji odvozena z databáze již zpracovaných strojů.

## 9. Rozhodovací blok

Zde se provede volba, zda požadavky na budoucí obrobek vyhovují nebo nevyhovují. Pokud jsou tolerance na stroji příliš vysoké, tak se vracíme zpět do bodu tři, kde je zvolen jiný typ stroje z výrobní řady výrobce. V případě, že požadavky jsou splněny, je předložena nabídka na obráběcí centrum zákazníkovi.

## 10. Vybraný typ stroje

Po odsouhlasení nabídky zákazníkem se přechází do bodu 11. a to k výrobě obráběcího centra.

## 11. Cenová nabídka nového popřípadě existujícího stroje

V tomto kroku je stanovena cenová nabídka nového, popř. již existujícího obráběcího stroje, která byla stanovena na základě získaných informací o stroji podložené firemní databází.

## 12. Kontrola parametrů nového stroje

Součástí metodiky je navrženo měření nově vyrobených strojů. Informace o měření jsou dále zpracovány a ukládány do databáze strojů. Zvyšování počtu vypracovaných výsledků měření sebou nese navýšení pravděpodobnosti predikovat hledané parametry budoucího obrobku s vyšší přesností. Dále je součástí navržených měření zajištění nových informací o provozních stavech obráběcího stroje, konkrétně navržené na svislé soustruhy. Zpracované data z těchto měření nesou vysokou hodnotu pro odhalení „slabých“ míst konstrukce a umožňují zpětně sledovat konstrukční změny.

## 13. Kontrola parametrů obrobku

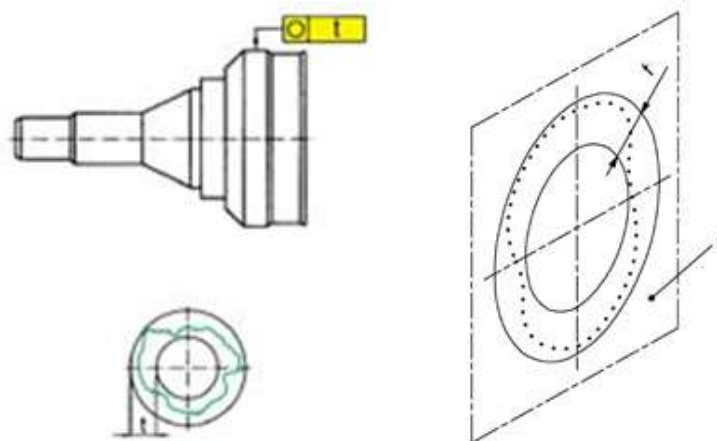
Zde jsou informace z provedených příslušných kontrolních měření obrobků opět zpracovány do databáze strojů a slouží k dalším srovnáním a jejich novému návrhu. Následující příklady geometrických tolerancí tvaru, směru a polohy jsou vybrány z ČSN ISO 1101 [35] a dle DIN ISO 2669[36].

Kontrolované parametry obrobků vyrobených na svislém soustruhu jsou:

- Úchylka kruhovitosti – soustružení bez C-osy
- Úchylka válcovitosti – soustružení bez C-osy
- Úchylka přímosti čelní plochy – soustružení bez C-osy
- Úchylka přímosti stran – soustružení s C-osou
- Úchylka kolmosti stran – soustružení s C-osou
- Úchylka rovnoběžnosti stran – soustružení s C-osou
- Úchylka kruhovitosti – soustružení s C-osou
- Úchylka roztečí mezi otvory – soustružení s C-osou
- Souosost – soustružení bez C-osy
- Úchylka čelního házení
- Úchylka obvodového házení

#### Ad a. Úchylka kruhovitosti

Největší naměřená vzdálenost skutečné kružnice od kružnice obalové. Toleranční zóna je ohraničena 2 soustřednými kružnicemi o vzdálenosti  $t$ . Obvodové linie tolerovaného válce musí ležet při libovolném radiálním řezu uvnitř obou kružnic.

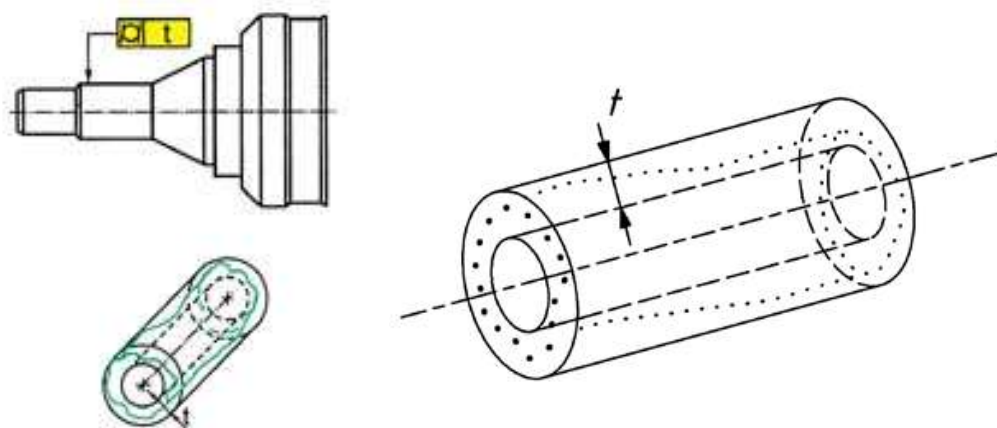


Obr. 10 Úchylka kruhovitosti [35].

#### Ad b. Úchylka válcovitosti

Největší naměřená vzdálenost mezi skutečným válcem a válcem obalovým. Úchylka válcovitosti zahrnuje úchyly kruhovitosti kolmých řezů, úchyly

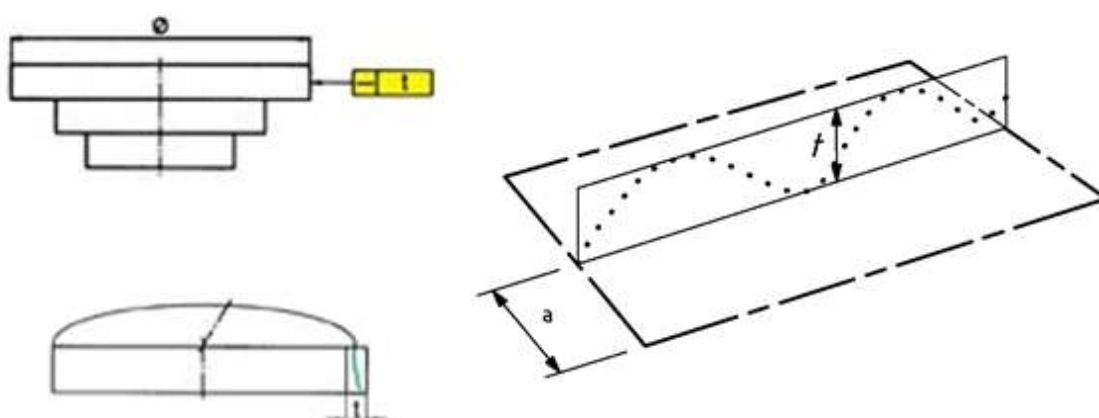
rovnoběžnosti a přímosti povrchových přímek. Toleranční zóna pro tolerovaný plášť válce je tvořena 2 koaxiálními válci s radiálním odstupem  $t$ . Tolerance válcovitosti ohraničuje odchylky mezi kruhovitostí, přímostí povrchových přímek a rovnoběžností povrchových přímek pláště válce k ose válce.



Obr. 11 Úchylka válcovitosti [35].

#### Ad c. Úchylka přímosti

Největší naměřená vzdálenost skutečné čáry nebo plochy od obalové přímky. Toleranční zóna je ohraničena 2 rovnoběžnými přímkami ve vzdálenosti  $t$ . Každá povrchová linie tolerovaného válce musí ležet mezi těmito oběma rovnoběžnými přímkami.

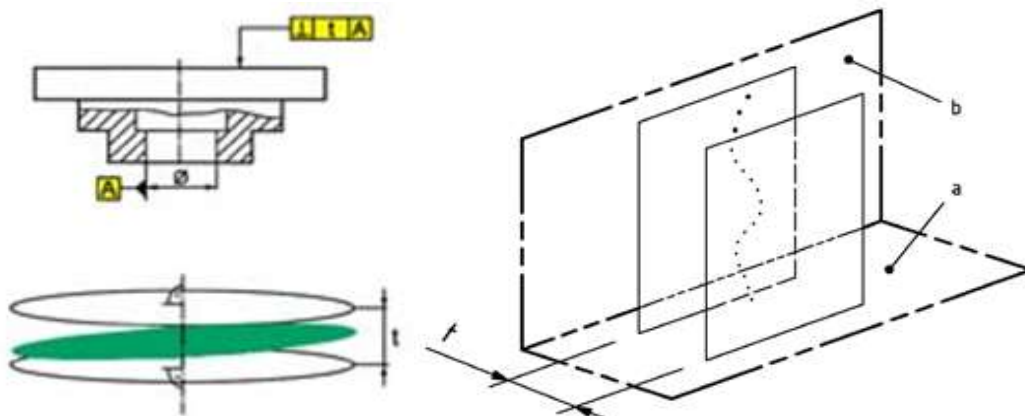


Obr. 12 Úchylka přímosti [35].



## Ad e. Úchylka kolmosti

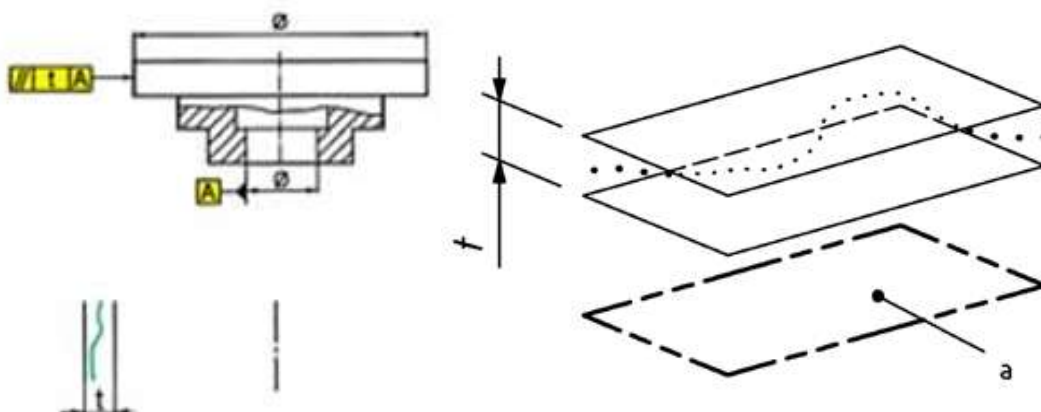
Rozdíl mezi skutečným úhlem a úhlem  $90^\circ$ . Toleranční zóna je ohraničena 2 rovnoběžnými rovinami o vzdálenosti  $t$ , které jsou kolmé ke vztažné ose. Tolerované čelní plochy musí ležet mezi těmito oběma rovinami.



Obr. 13 Úchylka kolmosti [35].

## Ad f. Úchylka rovnoběžnosti

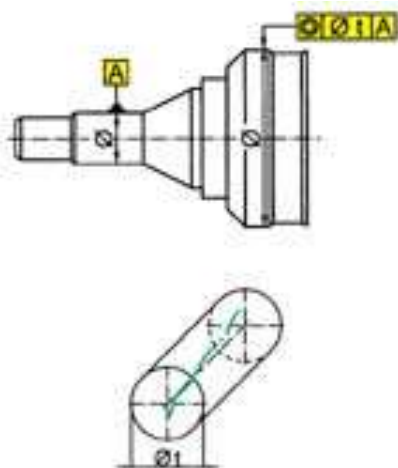
Rozdíl mezi největší a nejmenší vzdáleností obalových rovin ploch v předepsaném úseku. Toleranční zóna, v níž musí ležet povrchové linie tolerovaného válce, je ohraničena 2 rovnoběžnými přímkami o vzdálenosti  $t$ , které jsou rovnoběžné se vztažnou osou.



Obr. 14 Úchylka rovnoběžnosti [35].

## Ad i. Souosost

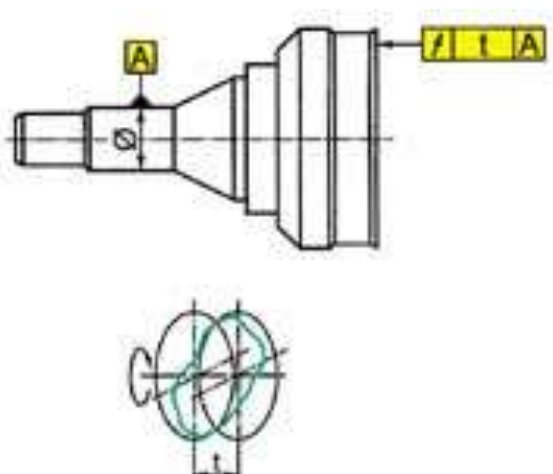
Toleranční zóna je ohraničena válcem o průměru  $t$ , jehož osa je totožná se vztažnou osou. Skutečná osa tolerovaných elementů musí ležet uvnitř toleranční zóny.



Obr. 15 Úchylka souososti [35].

## Ad j. Úchylka čelního házení

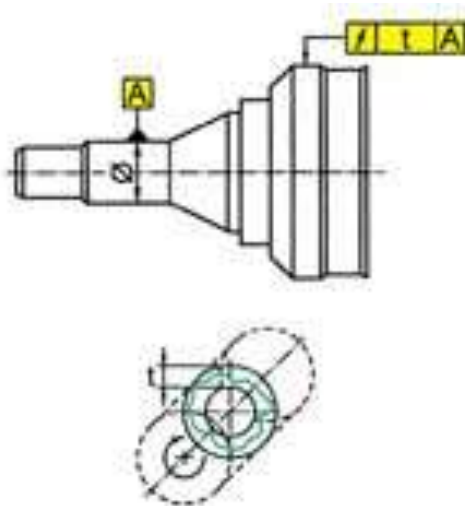
Rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou vzdáleností skutečné čelní plochy při otáčení předmětu. Toleranční zóna je ohraničena 2 rovnoběžnými rovinami o vzdálenosti  $t$ , které jsou kolmé ke vztažné (rotační) ose. Při opakované rotaci kolem vztažné osy a radiálním posunu sejmutí měřicích hodnot, musí všechny body povrchu tolerované čelní plochy ležet uvnitř toleranční zóny.



Obr. 16 Úchylka čelního házení [35].

## Ad k) Úchylka obvodového házení

Rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou vzdáleností jednotlivých bodů skutečné plochy od základní osy při otáčení předmětu. Toleranční zóna je v každém libovolném radiálním řezu kolmém ke vztažné ose ohraničená 2 kružnicemi o vzdálenosti  $t$ , jejichž společný střed leží na vztažné ose. Tolerance obvodového házení platí všeobecně pro jedno úplné otočení tolerovaných elementů kolem vztažné osy.



Obr. 17 Úchylka obvodového házení [35].

## 6.2 SOUČASNÉ PŘÍSTUPY KE ZJIŠŤOVÁNÍ GEOMETRICKÝCH CHYB OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Níže popsaná technika a přístupy měření jsou využívány k seřizování a sledování stavu obráběcího stroje. Geometrická přesnost vycházející z ustavení a seřízení obráběcího stroje je jednou z podmínek pro další úspěšné nasazení do výrobního procesu.

Prvním krokem, bez kterého nemá cenu dále postupovat v seřizování stroje, je samotné ustavení stroje. Cílem je dosáhnout předepsané vodorovnosti v celém pracovním rozsahu jednotlivých os, ustavování se provádí pomocí libel. Následně je provedena kontrola rovinnosti desky stolu a její kolmosti ke smykadlu stroje. Dalšími úkony jsou zkoušky obvodového a čelního házení desky stolu svislého soustruhu. Těmto zkouškám, platným pro všechny obráběcí stroje dal základy již v roce 1932 prof. Schlesinger. Tyto postupy, které byly postupem času do jisté míry rozšířeny, jsou využívány dodnes.

S dalším rozvojem číslicově řízených obráběcích strojů a zvyšování jejich pracovní přesnosti se začali využívat i nové přístroje pro jejich kontrolu. Např.

v roce 1973 byla nasazena dotyková sonda určené pro kontrolu geometrických charakteristik tehdy špičkových výrobků své doby, proudového motoru nadzvukového letounu Concorde [37]. S dalším vývojem měřících sond, kdy se neustále zvyšuje jejich přesnost, spolehlivost a možnosti nasazení, si našly tyto přístroje cestu do oblasti kontroly a kalibrace obráběcích strojů. Mezi tyto přístroje a přístupy k měření lze zařadit MT-Check, R-test od firmy IBS Precision Engineering (IBSPE) [38]. Dalším zástupcem zabývajícím se kontrolou a diagnostikou výrobních strojů je firma RENISHAW. Zástupcem v této oblasti může být měřící sada pro kontrolu pětiosých obráběcích center AxiSet Check-Up [39]. Přístroje MT-Check a AxiSet Check-Up jsou zobrazeny v následujícím obrázku (Obr. 18).



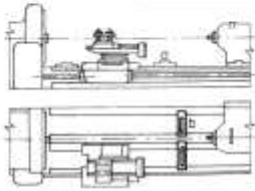
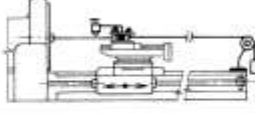
**Obr. 18** V levé části obrázku je zobrazen MT-Check fy. IBSPE a v pravé části je zobrazen AxiSet Check-UP fy. RENISHAW.

### 6.3 MĚŘÍCÍ TECHNIKA

- Podle Schlesingera

Postupy měření jsou dány příslušnými normami. Přístroje využívané u této zkoušky jsou přesná pravítka, přesná libela, číselníkový úchylkoměr a měřící trn.

Zkoušky geometrické a pracovní přístroje pro soustruhy s oběžnou přístrojovou do 1 600 mm

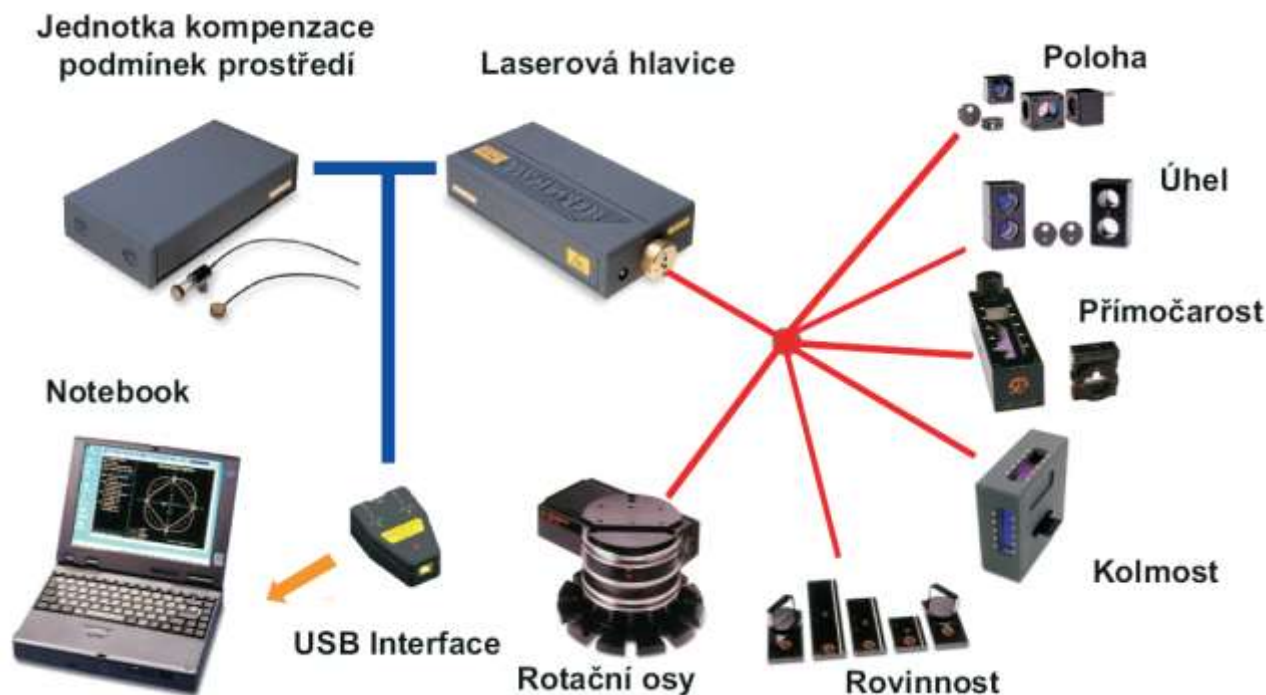
| Číslo | Předmět měření                                                      | Schéma měření                                                                     | Oběžná přístrojová do 1 600 mm                                  |           |
|-------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
|       |                                                                     |                                                                                   | Úchylky v mm                                                    |           |
|       |                                                                     |                                                                                   | obvyklé                                                         | maximální |
| 1     | Rovinnost vodorovných ploch na loži a) po délce lože b) napříč lože |  | $\pm \frac{0,01}{1.000}$ $\text{nebo}$ $\pm \frac{0,03}{1.000}$ |           |
| 2     | Přímčnost podélného pohybu suportu ve vodorovné rovině              |  | $\pm \frac{0,02}{1.000}$                                        |           |
| 3     | Rovnoměrnost vodorovných ploch pro koník s pohybným suportem        |  | $\pm \frac{0,02}{1.000}$                                        |           |

Obr. 19 Ukázka zpracování zkoušek podle Schlesingera.

- Laserinterferometr

Laserové systémy disponují vynikajícími vlastnostmi k měření přesnosti a kalibraci strojů. Jsou to nejpřesnější zařízení pro měření délek a geometrických veličin u obráběcích strojů. Tyto systémy používají jako etalon délky laser se stabilizovanou a ověřenou vlnovou délkou. U všech výrobců laserových interferometrů je základem zdroj koherentního světelného záření. Mezi výrobce patří např. firma Limtek Laser Division, Renishaw, DEOM, s.r.o., a další. Pro měření přesnosti najetí osy je běžně ve firmě TOSHULIN využíván přístroj ML-10 od firmy RENISHAW (Obr. 20). Pro experimentální měření na demonstrátoru byl využit tento přístroj také, přičemž dosahované parametry laserinterferometru jsou:

- Přesnost lineárního měření:  $\pm 0,7 \text{ ppm} (\mu\text{m}/\text{m})$
- Rozlišení: 0,001 mikrometrů
- Maximální rychlost:  $\pm 4 \text{ m/s}$
- Přesnost kmitočtu:  $\pm 0,05 \text{ ppm} (\mu\text{m}/\text{m})$



Obr. 20 Systém Laserinterferometr fy. RENISHAW

- Laser Tracker

Dalšími moderními přístroji objevujícími se nejen u výrobců obráběcích strojů jsou přístroje s názvem Laser Tracker. Důležitou funkcí, kterou tyto přístroje disponují je Tracker laser. Ten může pracovat na dvojím principu inkrementálního nebo absolutního měření. Inkrementální měření se provádí pomocí interferometru (IFM) s frekvenčně stabilizovaným helium-neonovým laserem. U této metody nesmí dojít k přerušení paprsku, jinak se musí vrátit Tracker zpět do referenčního bodu a celé měření provést znovu. Vlivem nestability procesu dochází často k přerušení laserového paprsku. Tato vlastnost je hlavní nevýhodou IFM a byla odstraněna novější laserovou technologií Trackeru. Systém představený pod zkratkou ADM pracuje na principu absolutního měření vzdálenosti. Výhodou ADM měření v dílčích měřeních vzdáleností je schopnost jednoduše zaměřit bod paprsku na cíl a „vystřelit“. Tyto systémy prošly v několika letech dramatickými zlepšeními a neustále se přibližují přesností IFM systémům [32]. Nevýhodou ADM je pořád menší přesnost než u IFM a tudíž pro oblasti VS a CMM nenachází uplatnění. Mezi hlavní výrobce Laser Trackerů patří firmy API, FARO, LEICA. Základní parametry současně vyráběných přístrojů jsou zobrazeny v následující tabulce (Obr. 21).



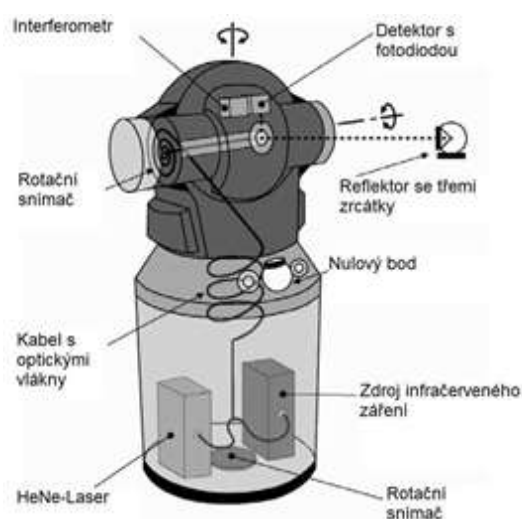


| Typ laseru         | ADM&IFM               | ADM                                    | ADM (vol.IFM)                          | ADM                                    | ADM&IFM                                |
|--------------------|-----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 3D přesnost        | $\pm 5 \mu\text{m/m}$ | $\pm 18 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ | $\pm 36 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ | $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ | $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ |
| Dosah (vzdálenost) | 60m                   | 60m                                    | 55m                                    | 160m                                   | 80m                                    |
| Dosah (úhel)       | $+77^\circ/-60^\circ$ | $+77^\circ/-60^\circ$                  | $+72,5^\circ/-52,5^\circ$              | $\pm 145^\circ$                        | $\pm 45^\circ$                         |

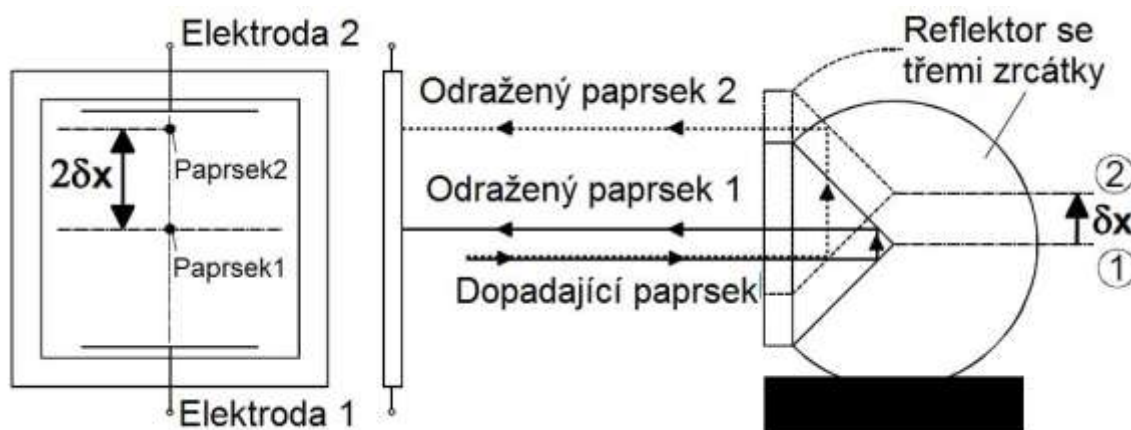
Obr. 21 V současnosti nabízené Laser Trackery.

Pro experimentální měření na demonstrátoru byl využit přístroj Laser Tracker T3 od firmy API, přičemž dosahované parametry Laser Trackeru jsou:

- Přesnost 3D (IFM):  $\pm 5 \text{ ppm}$  (2 sigma)
- Rozlišení (IFM):  $0,08 \mu\text{m}$
- Přesnost (IFM):  $\pm 0,5 \text{ ppm}$
- Rozlišení (ADM):  $0,1 \mu\text{m}$
- Přesnost (ADM):  $\pm 15 \mu\text{m}$



Obr. 22 Schéma Laser Trackeru T3, fy. API [42] – vlevo, Laser Tracker fy. Faro – vpravo [32].

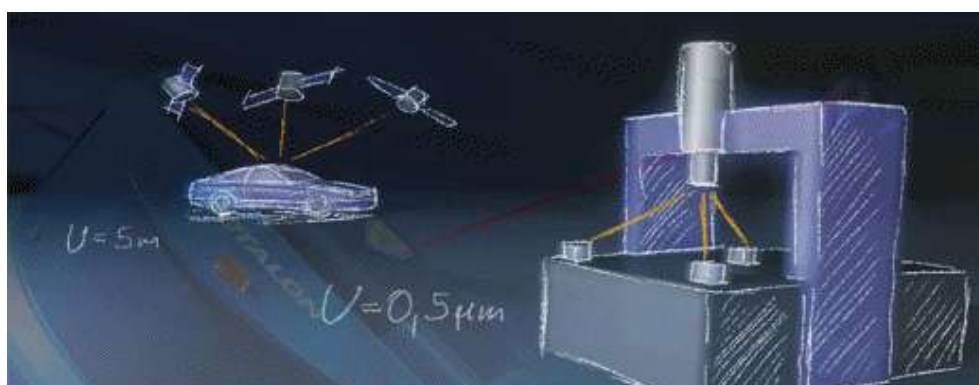


Obr. 23 Princip snímání paprsku [32].

- Laser Tracer

Tento nový produkt stál na počátku vzniku firmy ETALON AG v roce 2004. Firma ETALON AG se svým produktem Laser Tracer byla zaměřena především na CMM stroje. Díky vlastnostem produktu, mezi které patří především dosahovaná přesnost, si přístroj postupem času našel využití v oblasti kontroly a kompenzací ve výrobních strojích. Jedná se tedy opět o moderní zařízení sloužící ke zkoušení, kalibraci a kompenzaci VS a CMM. Princip měření je opět založen na vyslání laserového paprsku a sledování fázového posunutí vlnové délky. Inovativní přístup zařízení je v matematickém zpracování naměřených dat, které funguje na principu GPS (viz. Obr. 24). Je tedy nutné na jednom stroji provést několik měření, ale za cenu vyšší přesnosti než je tomu u Laseru Trackeru. Nejvyšší dosahovaná přesnost za normálních podmínek je dána vztahem:

$$U_{(k=2)} = 0,1\mu m + 0,3\mu m/m \quad (2).$$



Obr. 24 Princip Laser Traceru fy. ETALON AG založený na GPS systému [40].



- Další měřicí technika

Mezi další technické vybavení využitě při experimentálním měření demonstrátoru patří:

- Hodinky
- Optický senzor
- Kontaktní senzor Micro-Epsilon (kalibrace)

Jednotlivé vybavení bude blíže specifikováno v kapitolách věnované příslušnému měření.

## 6.4 NÁVRH MĚŘENÍ

Zpracování návrhu měření a vyhodnocení vybraného obráběcího centra - svislého soustruhu je voleno tak, aby byly využity zejména dostupné přístroje jak na FSI VUT v Brně, tak i přístroje ve vlastnictví firmy TOSHULIN, a.s.

Výsledný přístup k měření by měl být co nejméně finančně náročný na případné pořízení nových přístrojů v rámci realizace zpracování metodiky měření.

### 6.4.1 Identifikace chyb obrobku z chyb na stroji

Jelikož návrh a požadavky na měření budou vycházet z obrobků vycházejících z produkce strojů firmy TOSHULIN, je nezbytně nutné tyto chyby blíže popsat. Dle dokumentace z TOSHULIN [29] se provádí zkoušky na obrocích dle normy ČSN ISO 3665 P1 a P3, a to na všech vyrobených strojích. Jsou to zkoušky pracovní přesnosti, kde předmětem zkoušky jsou kruhovitost, válcovitost a přímost obrobené plochy dle normou specifikovaného obrobku a způsobu obrábění. U zkoušky kruhovitosti se pohybují přípustné tolerance do 0,02 mm, pro hodnoty válcovitosti do 0,02/300 mm a pro zkoušku přímosti hodnoty do 0,03 mm. Přípustné hodnoty se mohou lišit na typu stroje a dále podle stroje s normální nebo zvýšenou přesností.

Možné příčiny sledovaných chyb lze přisuzovat chybám vzniklých v jednotlivých uzlech svislého soustruhu. Chyba kruhovitosti vzniká od změny polohy v osách X a Y a natočení desky v průběhu jedné otáčky, tj. od házení desky svislého soustruhu, popř. kmitání břitu nástroje. Chyba válcovitosti se skládá z chyby kruhovitosti a další chyby vznikající v ose Z, tedy posuvu nástroje. Chyba přímosti vzniká na desce svislého soustruhu odchylkami od osy Z, jak od nástroje, tak od desky. Samozřejmě lze říci, že každá geometrická, popř. kinematická chyba jednotlivých komponent stroje ovlivňuje každou chybu, vzniklou v průběhu obrábění na obrobku. V rámci možností měření a vyhodnocení je nutné se držet určitých mezí, které umožní popis svislého soustruhu.

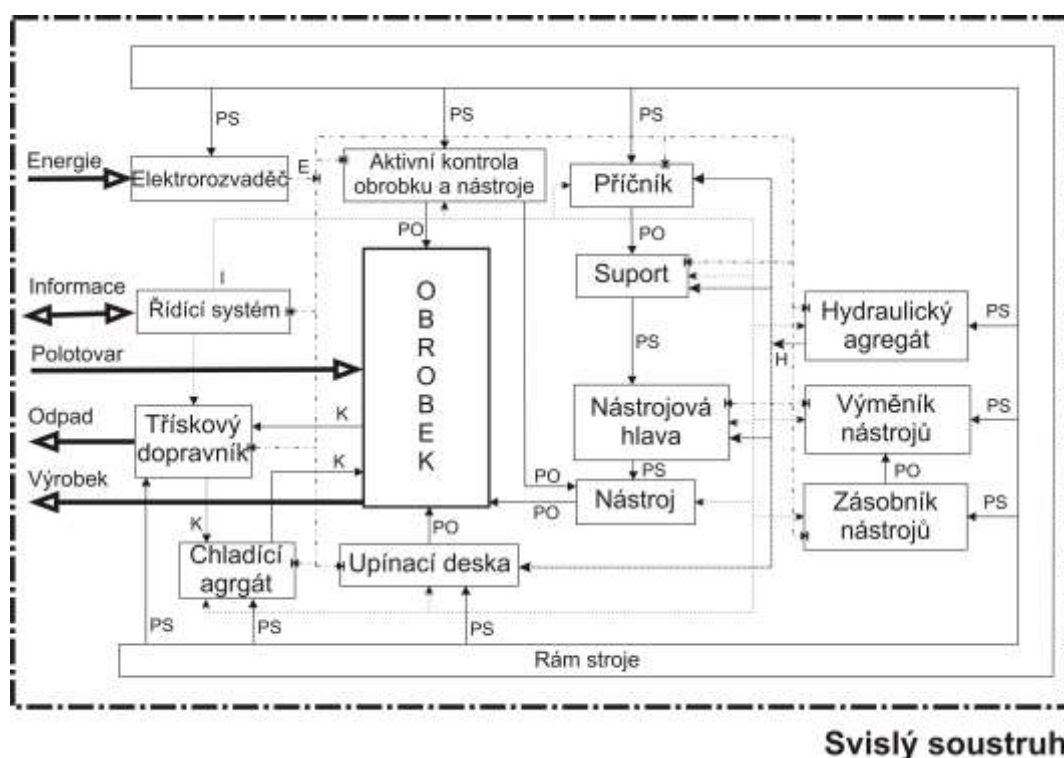
Před samotným návrhem zpracování je nutné stanovit, do jaké úrovně (hloubky) budou geometrické chyby sledovány.

Jako příklad byla zvolena metoda „Top-down“, která nám dovolí postupně nahlédnout na konstrukci svislého soustruhu (POWERTURN). První stupeň pro další dekompozici svislého soustruhu je zobrazen na následujícím obrázku.



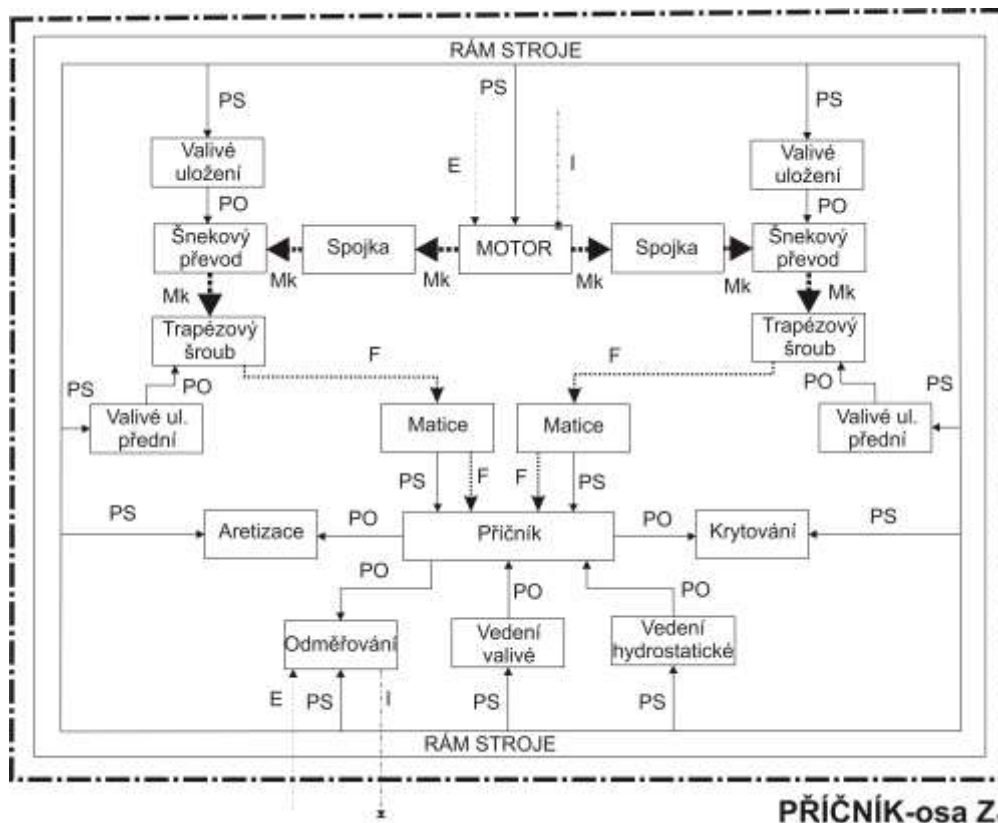
Obr. 25 Blokové schéma svislého soustruhu.

Druhý stupeň není ještě z hlediska konstrukčních uzlů zcela vypovídající. Je zde zcela patrná polohová vazba obrobku s upínací deskou a systému nástroj-nástrojová hlava-suport-příčník. Těmito dvěma konstrukčními uzly povede třetí stupeň dekompozice svislého soustruhu, který se bude skládat z konstrukčního uzlu příčníku, suportu, smykadla a rotační desky.

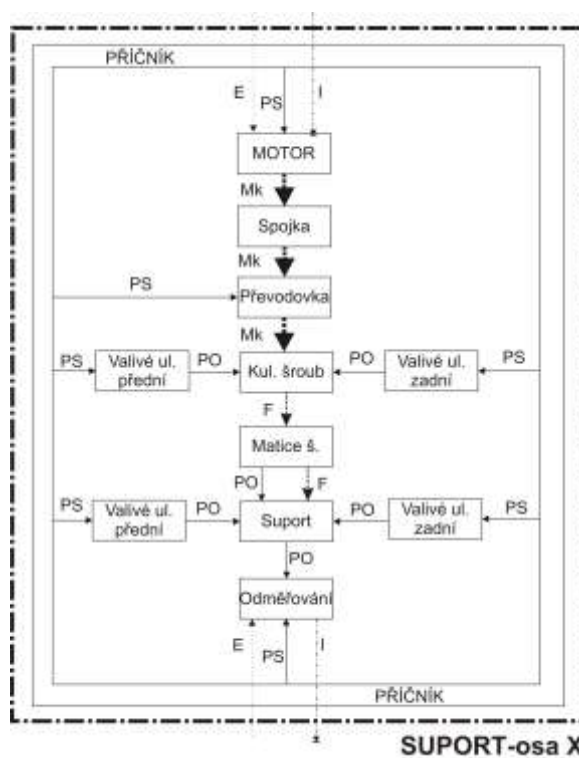


Svislý soustruh

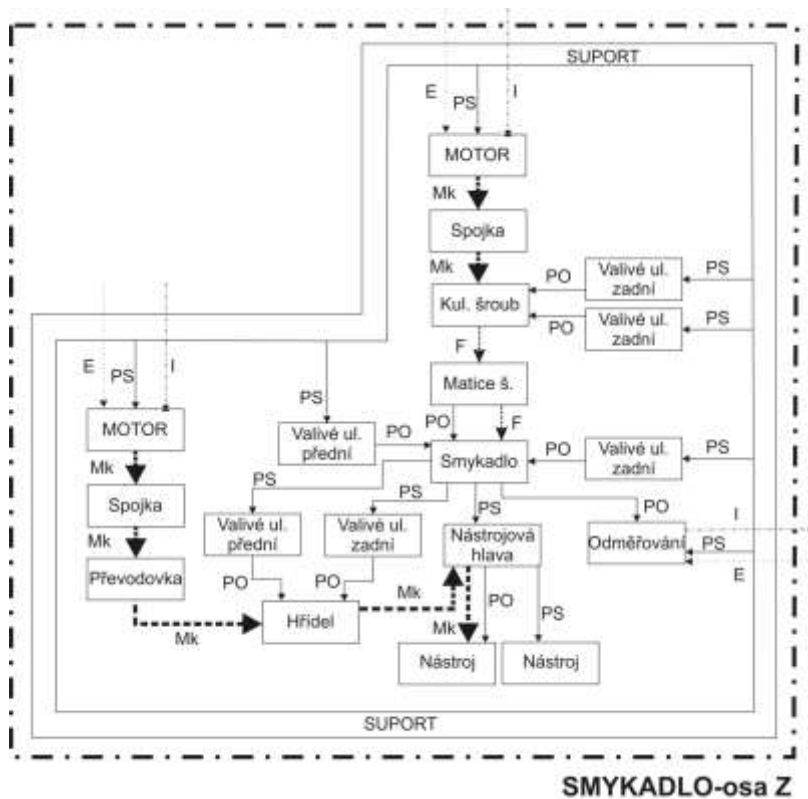
Obr. 26 Blokové schéma karuselu PWT – 2. Stupeň.



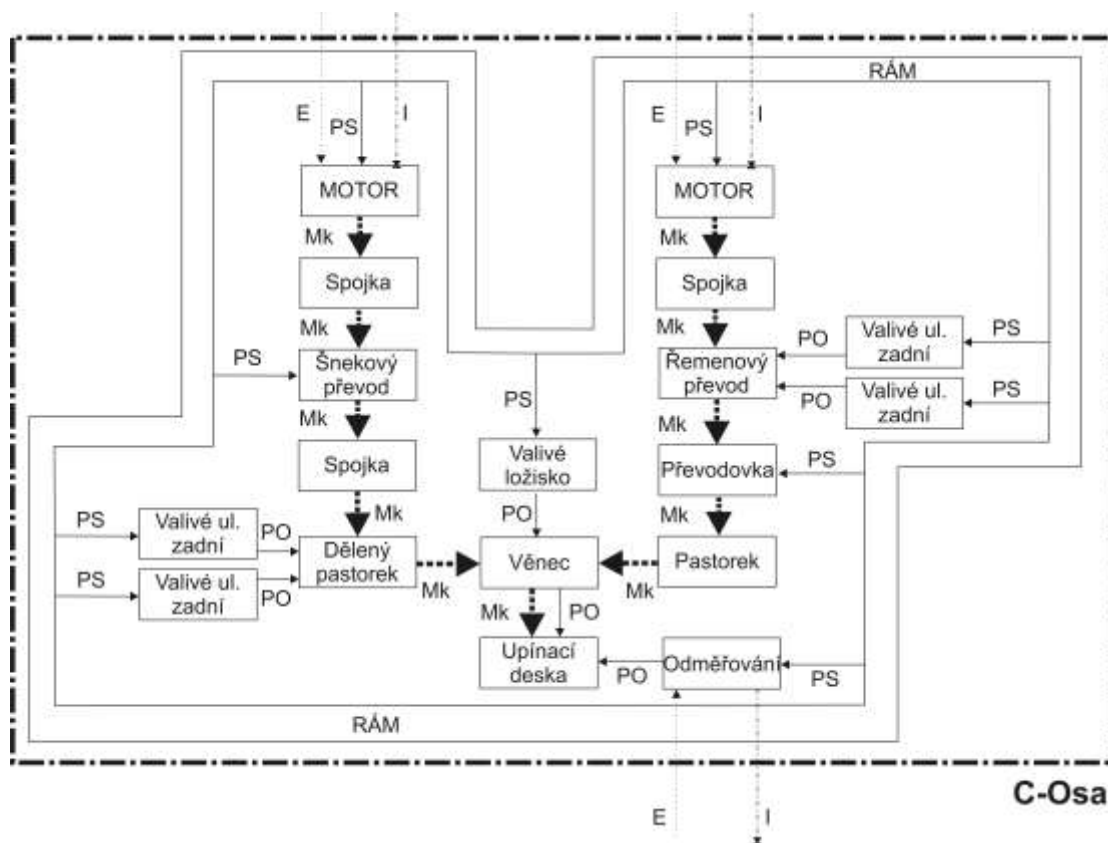
Obr. 27 Blokové schéma příčníku karuselu PWT – 3. Stupeň.



Obr. 28 Blokové schéma suportu karuselu PWT – 3. Stupeň.



Obr. 29 Blokové schéma smykadla karuselu PWT – 3. Stupeň.



Obr. 30 Blokové schéma rotační desky karuselu PWT – 3. Stupeň.

Zkratky a symboly použité v dekompozici svislého soustruhu:

- PO – polohová vazba
- PS – pasivní polohová vazba
- Mk – přenos krouticího momentu
- E – elektrická energie
- I – informace
- F- přenos síly
- K- kapalina

Jak je patrné z dekompozice svislého soustruhu, je celá soustava složena z mnoha podsoustav, které přímo i nepřímo ovlivňují geometrickou i kinematickou přesnost stroje. Pro ilustraci byl systém rozložen pouze do 3. Stupně. V dalším kroku bychom mohli dále rozkládat každé blokové schéma zvlášť (čtvrtý stupeň) a to se zřetelem na geometrickou přesnost. Tento postup by mohl být aplikován až do elementárních prvků celé soustavy.

Takovýto přístup by z hlediska splnění cílů dizertační práce byl nesmírně náročný na dokumentaci celého stroje, kontrolní výstupy přesnosti elementárních prvků, podsoustav a nakonec celé soustavy. Za předpokladu, že by tyto informace byly dostupné, muselo by vzniknout velké množství předpokladů např. o správném předepnutí všech šroubů, přesnosti stykových ploch, montážní přesnosti atd. Takovýto přístup ke kontrole a montáži je možné vidět v automobilovém průmyslu (např. výrobní linka VW - Phaeton, Drážďany), kde každý pracovník vykonává jednu činnost v cyklu 5-10min. Ke každému úkonu při montáži má pracovník audio-podporu, tzn., že předinstalovaný systém mu říká, co má udělat (např. na jaký moment jaký šroub dotáhnout). Tímto krokem jsou minimalizovány chyby, které v průběhu montáže mohou vzniknout. U výrobců obráběcích strojů je tento přístup nereálný, a to z hlediska výrobní produkce, kdy se jedná o cca. 20 strojů/rok. Montážní pracovník zde vykonává nejen montáž, ale přímo i výrobu některých z komponent. V tomto případě je větší pravděpodobnost zanesení chyby do montáže.

Zpracováním analýzy možnosti získání informací a případné kontroly jednotlivých podsoustav vyšla tato varianta jako nereálná, a to z hlediska časové a finanční náročnosti. Při poskytnutí veškerých dokumentů o strojích firmou TOSHULIN, bylo zjištěno, že pro splnění cílů dizertační práce jsou informace o přesnostech strojů nedostačující. Do procesu kontroly svislých soustruhů by se musely zanést nové postupy měření, a i z tohoto důvodu byla tato varianta zavrhnuta.

Při zpracování možností této varianty bylo provedeno několik analýz jednotlivých podsoustav stroje, mezi které patří i rotační deska svislého soustruhu. Z prvního rozboru byl jako základní prvek ovlivňující přesnost chodu rotační desky vybrán křížové ložisko. Zde byla provedena prvotní analýza přesnosti rotační desky na přesnosti použitých ložisek. Z výsledků byly stanoveny závěry, které popisovaly přesnost ložiska na přesnosti chodu rotační desky. Ukázka získaných dat je přiložena v příloze 16.2.

Dále bylo možné sledovat příčníky strojů, jejich geometrickou a kinematickou přesnost a výslednou přesnost pohybu nástroje v ose X. Jak již bylo řečeno, tyto kroky by měly smysl, kdyby bylo možné provádět kontrolu geometrické i kinematické přesnosti dílčích podsystémů. Tento krok byl zpracován společně s doktorandem Ing. Michalem Michalíčkem. Opět je ukázka získaných výsledků doložena v příloze 16.3.

Při dalším rozboru úlohy a provedených rešerší byl stanoven přístup, kde bylo sledováno chování stroje (soustavy) jako celku. V průběhu řešení byl tento systém rozdělen na dva podsystémy. První samostatně sledovanou částí je rotační pohyb stroje a druhou výsledný translační pohyb. Tento přístup mohl být použit za předpokladu, že chyby vzniklé translačním pohybem nebudou ovlivněny chybami vzniklými od translačních pohybů.

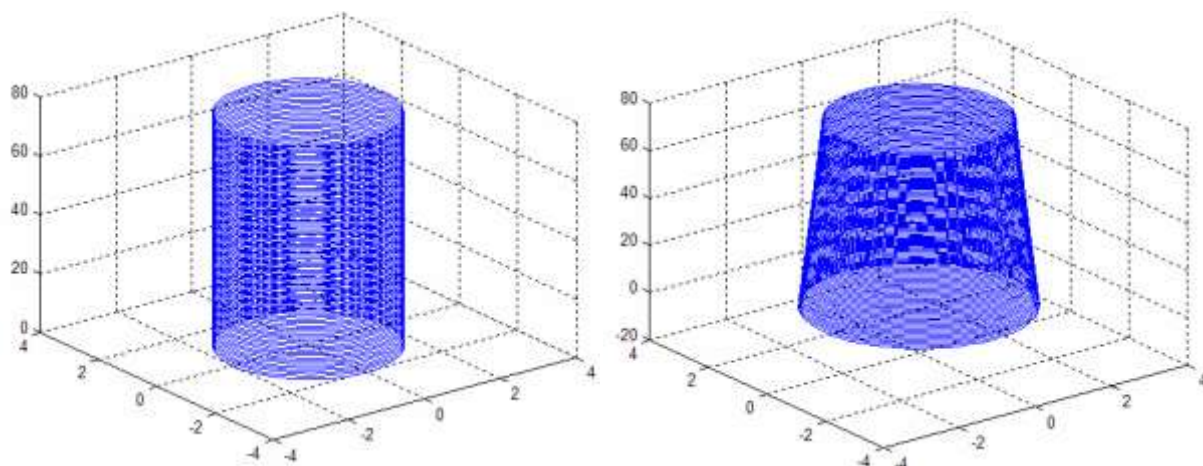
Sledování a popis pouze dvou částí stroje, je časově méně náročné. Není potřeba věnovat se podsoustavám, které se navzájem negativně ovlivňují, čímž se výrazně zjednoduší zpracování metodiky měření. Nevýhodou bude vyšší náročnost na analýzu získaných výsledků z pohledu identifikace příčin vzniklých chyb na stroji. Zde budou hrát vysokou roli zkušenosti kontrolního a konstruktérského týmu, které budou moci společně příčiny identifikovat a v dalším vývoji eliminovat. Hlavním předpokladem pro přijatelnost výsledků jsou dodržované výrobní a montážní předpisy, definované výrobními výkresy, výkresy sestav atd.

#### **6.4.2 Stav vědy a techniky v oblasti popisu geometrických odchylek obrobku**

Dalším krokem je podrobný popis geometrických chyb vybraného stroje, v tomto konkrétním případě se jedná o popis svislého soustruhu. Z provedené rešerše lze konstatovat, že téma popisu chyb a kompenzačních metod obráběcích strojů je neustále řešené téma. Řešení těchto úloh se odlišuje vždy od typu zkoumaného stroje a cíle řešení. Jak bylo již na začátku konstatováno, nejvíce prací se zabývá kompenzačními metodami pro různé typy obráběcích strojů a CMM. Mnohem méně autorů se zabývá přístupem měření a zpracování získaných informací o strojích a téměř žádné publikace nebyly nalezeny z oblasti přesnosti měření, zpracování, vyhodnocení svislých soustruhů. Autor Anand ve své práci [41] popsal metodiku pro modelování statické chyby v loži stroje a její vliv na geometrii při vodorovném soustružení. Výslednou chybu přepočítal přes již zmiňovanou HTM

s následnou simulací. Výsledkem práce je konstatování, že nejvýznamnější složkou chyby u vodorovného soustružení jsou chyby vzniklé při posuvu v ose Z.

Závěr práce je věnován simulacím válcového obrobku při různých vstupních podmínkách, jako jsou chyba osy a frekvence otáček. Na následujícím obrázku (Obr. 31) je ukázka ideální plochy obrobku bez ovlivnění chybami osy Z a obrobek, kde jsou zaneseny geometrické chyby stroje.



a) Simulace ideální plochy

b) Simulace plochy s geometrickými chybami

**Obr. 31** Výsledky simulací obrobku při vodorovném soustružení dle Anand [41].

Druhý autor Weck v publikaci [42] popisuje principy měření rotačních os obráběcích strojů. Nastínění problematiky následně popisuje na příkladu s měřením pomocí laseru a fotodiod. Na Obr. 32 je znázorněn princip měření na odvalovacím frézovacím stroji. Na rotační desku je umístěn zdroj laseru, který vysílá paprsek. Ten je zachycen v příslušné rovině měření pomocí fotodiod a naměřené hodnoty dále vyobrazeny a vyhodnoceny. V ideálním případě by vytvořil paprsek na rovině fotodiod kružnici, v opačném případě paprsek vytvoří deformovanou kružnici, která zachycuje rušivý pohyb, naklonění rotační desky a odchylky házení. Na Obr. 33 je právě znázorněn měřený rotační stůl s příslušnými chybami.

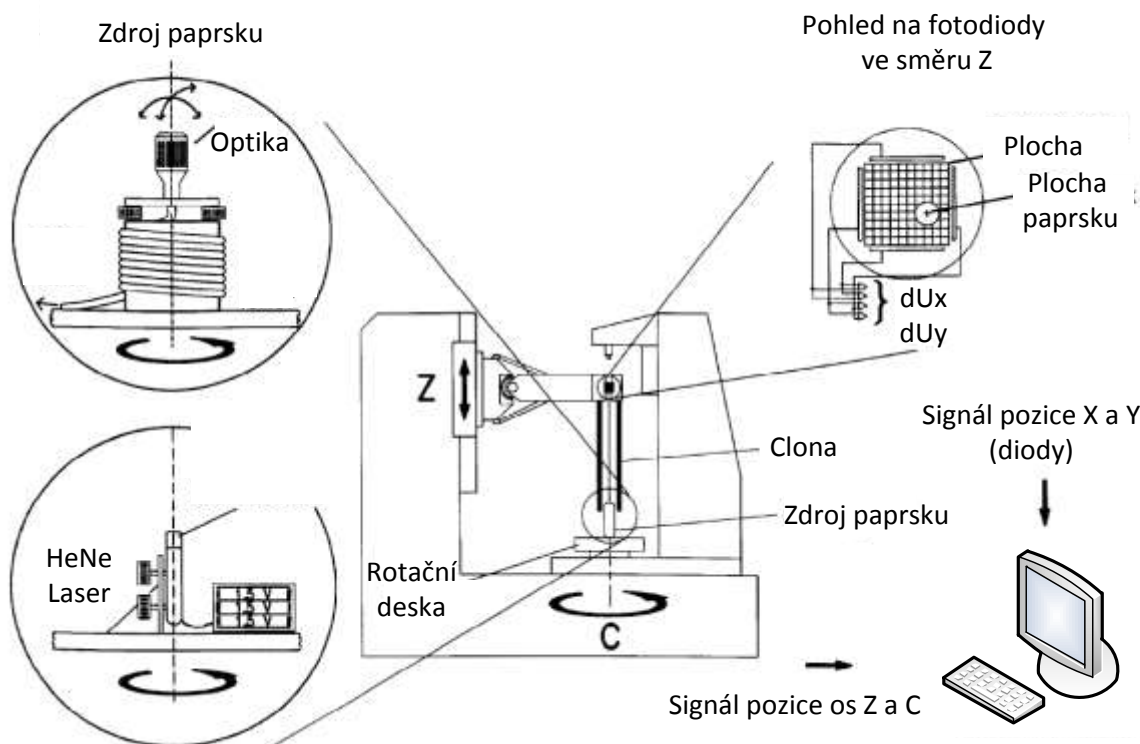
Nutnost znát aktuální natočení desky ( $\varphi$ ) vyplývá z následného rozboru principu měření. V úvahu je zde brán jak posuv v rovině ( $\delta_T$ ) X, Y, tak naklopení desky okolo osy ( $\gamma_K$ ) Y a z těchto chyb je dále možné vyjádřit změnu skutečné polohy desky vůči ideální (popř. vůči poloze nástroje).

Naklopení kolem osy Y ( $\gamma_K$ ) je možné za předpokladu, že měření je prováděno ve dvou pevně daných hladinách  $h_1$ ,  $h_2$ , potom je naklopení:



$$\gamma_k(\varphi) = \arctan \left[ \frac{(R_{m2} + x_2(\varphi)) - (R_{m1} + x_1(\varphi))}{h_2 - h_1} \right] - \arctan \left[ \frac{R_{m2} - R_{m1}}{h_2 - h_1} \right] \quad (3).$$

, kde  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$  jsou kružnice kužele odchylky,  $x_2$ ,  $x_1$  jsou naměřené hodnoty v rovinách  $h_1$ ,  $h_2$  a  $\varphi$  je úhel natočení rotační desky.



Obr. 32 Zařízení pro zprostředkování odchylek kruhovitosti a rovnoběžnosti s osou Z [42].

Dalším parametrem je radiální odchylka  $\delta_T$ , která je získána z odchylek v x-směru příslušné výšky ( $h_1$ ,  $h_2$ ) a je dána vztahem:

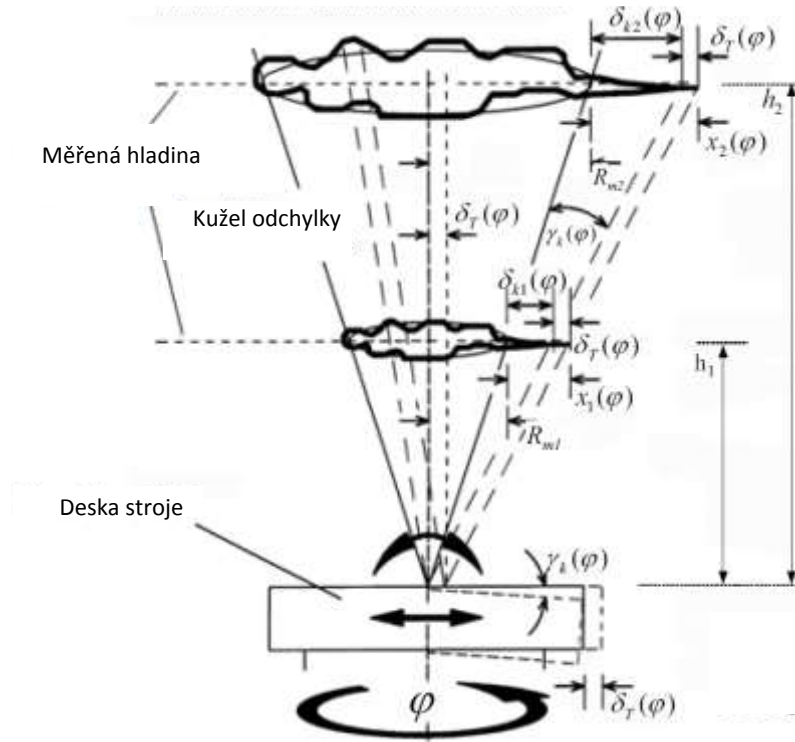
$$\delta_T(\varphi) = \frac{x_1(\varphi)h_2 - x_2(\varphi)h_1}{h_2 - h_1} \quad (4).$$

Poslední hodnotou popsanou autorem je odchylka od naklonění  $\delta_{ki}$  závislá na výšce  $h_i$ , která je definovaná jako:

$$\delta_{ki}(\varphi) = h_i \frac{x_2(\varphi) - x_1(\varphi)}{h_2 - h_1} \quad (5).$$



, přičemž  $h_i$  je libovolná výška na měřeném kuželu.



**Obr. 33** Působení natočení a translačního pohybu rotační desky na výsledné házení v rozdílných polohách na ose Z [42].

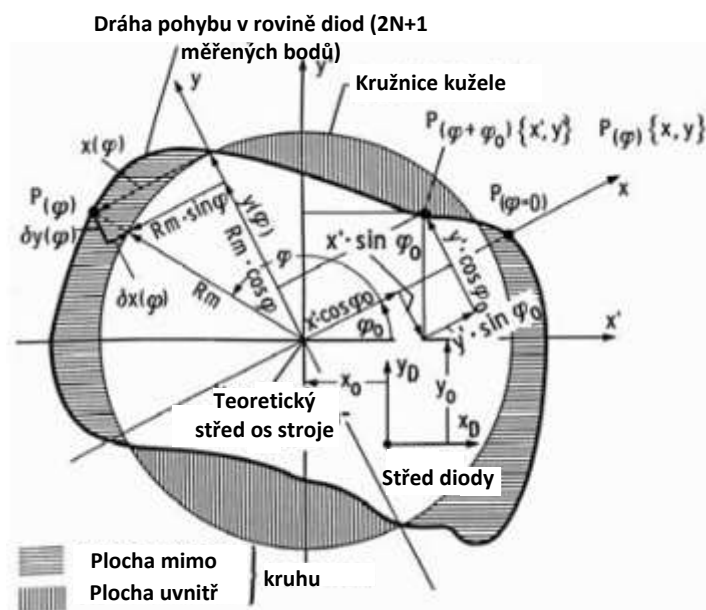
V dalším kroku je nutné dopočítat hodnoty  $R_m$ , které vychází z naměřených dat (odchylek  $U_x$ ,  $U_y$ ).

V souřadnicovém systému stroje (x-y) dle Obr. 33. Jsou složky odchylek chodu desky vyjádřeny jako:

$$\begin{aligned} \delta_x(\varphi) &= x(\varphi) - R_m \cos(\varphi) \\ \delta_y(\varphi) &= y(\varphi) - R_m \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (6).$$

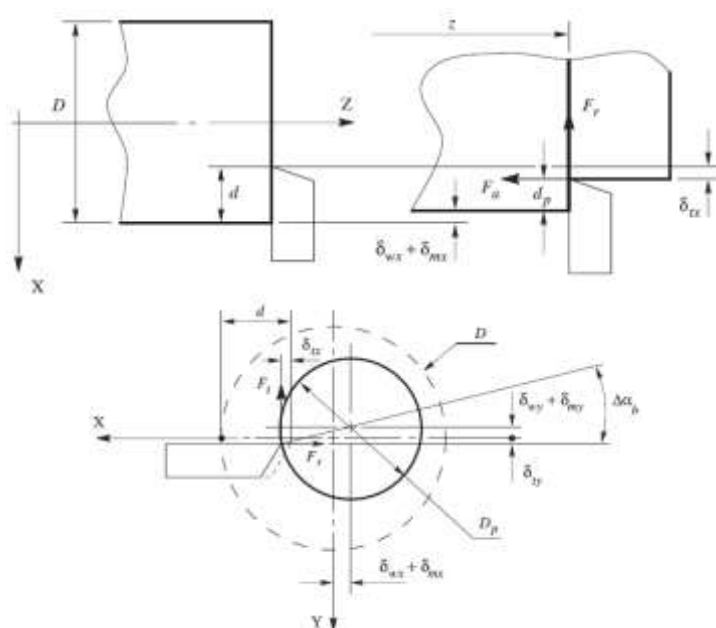
Poloměr  $R_m$  je určen pomocí Simpsonovy metody, která spočívá v tom, že plochy mezi kružnicí a dráhou pohybu stopy paprsku mimo kružnici a uvnitř kružnice jsou stejně velké. Předpokladem je lichý počet bodů měření ( $M = 2N + 1$ ) v intervalu úhlu otočení desky stolu ( $0, 2\pi$ ).

$$R_m = \sqrt{\frac{1}{6N} \left[ 2x_{(\varphi=0)}^2 + 4 \sum_{k=0}^{N-1} \left( x_{(\varphi=(2k+1)\frac{\pi}{N})}^2 + y_{(\varphi=(2k+1)\frac{\pi}{N})}^2 \right) + 2 \sum_{k=0}^{N-1} \left( x_{(\varphi=2k\frac{\pi}{N})}^2 + y_{(\varphi=2k\frac{\pi}{N})}^2 \right) \right]} \quad (7).$$



Obr. 34 Vyhodnocení naměřených bodů [42].

Další autoři Mayer at al. [43] se zabývali ve své publikaci predikováním rozměrů obrobku při soustružení, přičemž sledovali geometrické odchylky vyvolané při soustružení příslušnými silami od obrábění. Bylo zde bráno v úvahu, že stroj se chová jako tuhé těleso. V úvahu pro výpočet bral autor následující parametry: hloubkou záběru  $d$ , deformace obrobku a posun středu rotace ve směru  $X$  označená na následujícím obrázku jako  $\delta_{mx}$  a  $\delta_{wx}$ . Obdobě totéž pro osu  $Y$  složky  $\delta_{my}$  a  $\delta_{wy}$ . Silové složky  $F_r$  a  $F_t$  způsobují odklon nástroje o hodnoty  $\delta_{tx}$  a  $\delta_{ty}$ , odchylku od síly  $F_a$  autoři zanedbávají. Dále je zanedbána odchylka vzniklá od úhlu  $\Delta\alpha_b$ .



Obr. 35 Chyby vzniklé při vodorovném soustružení [43]

Jako výsledek výše uvedených elastických výchylek nástroj-obrobek je odhadovaná nominální hodnota označena jako  $D_p$ . Geometrický rozbor procesu na základě předchozího obrázku vede k následujícímu výrazu, pro předpokládaný průměr obrobku  $D_p(z)$  ve směru osy  $Z$ .

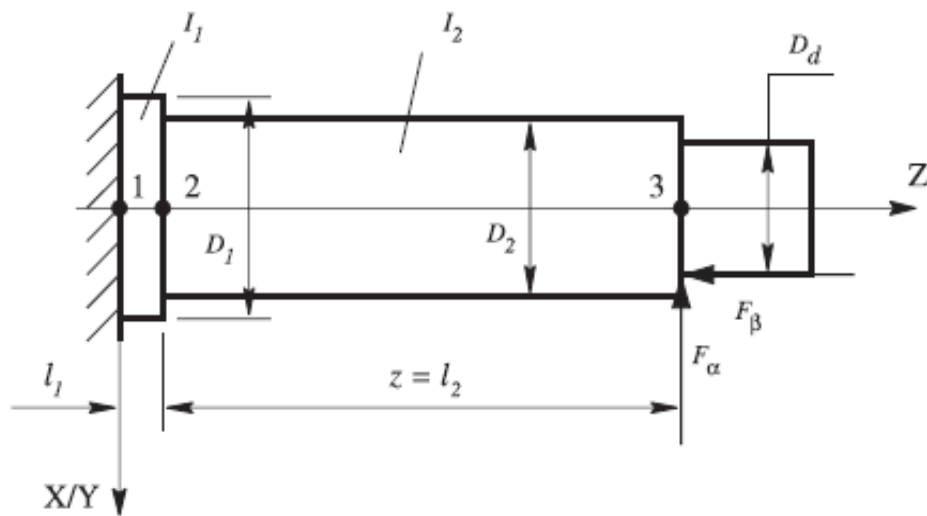
$$D_p(z) = 2 \sqrt{\left[ \frac{D}{2} - D + \delta_{tx}(z) - \delta_{wx}(z) - \delta_{mx}(z) \right]^2 + [\delta_{ty}(z) - \delta_{wy}(z) - \delta_{my}(z)]^2} \quad (8).$$

, potom chyba je:

$$\Delta D(z) = D_p(z) - D + 2d \quad (9).$$

Zde je uveden příklad pro výpočet odchylky  $\delta_{wx}/\delta_{wy}$ :

$$\delta_{wx,wy}(z) = \frac{2F_\alpha(I_1 z^3 + 3I_2 I_1 z^2 + 3I_2 I_1^2 z + I_2 I_1^3) + 3M(I_1 z^2 + 2I_2 I_1 z + I_2 I_1^2)}{6EI_2 I_1} \quad (10).$$

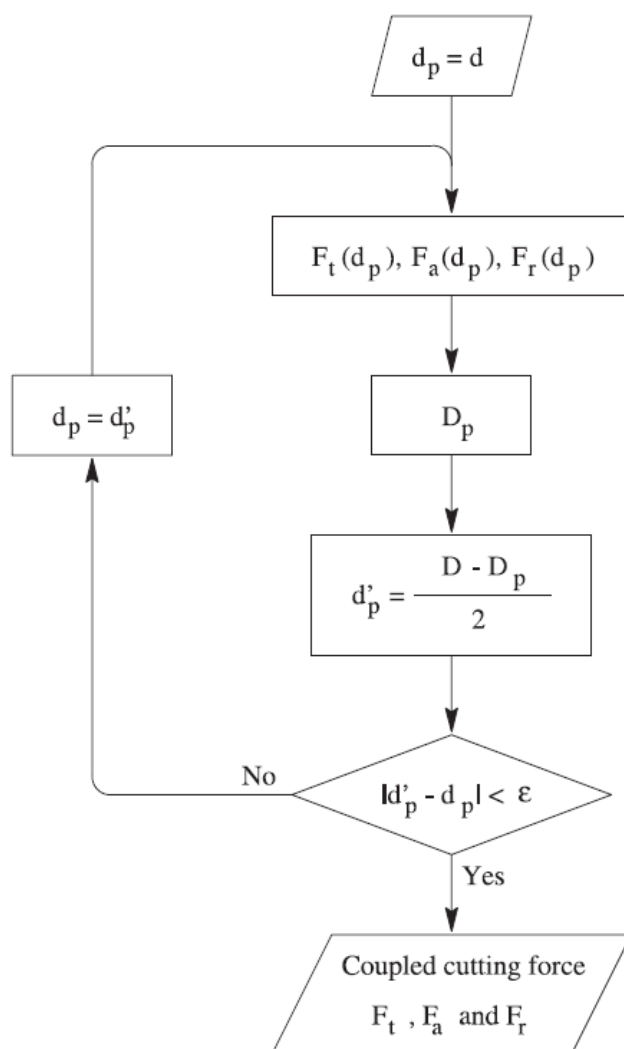


Obr. 36 Podmínky pro výpočet deformace [43].

Výsledkem této publikace je predikování geometrické přesnosti budoucího obrobku na hloubce řezu soustružnického nože. Na základě stanovené chyby, která slouží jako rozhodovací prvek v cyklu (Obr. 37.), je určena hloubka třísky pro obrábění.

Výše předložené publikace se zabývají především problematikou soustružení s horizontálně položeným vřetenem a „malými“ obrobky. Přesnost budoucího obrobku je predikována z různých úvah a vždy při zavedení definovaných zjednodušení. I přesto je možné tyto publikace okrajově využít, jako zdroj pro navržení potřebného měření a vyhodnocení pro svislé soustruhy.

K metodice identifikaci těchto základních chyb obrobků bude navrženo měření včetně přístrojového vybavení. Jelikož výslednou chybu je možné rozdělit na dvě nezávislé chyby, a to od rotace a translace, budou tyto pohyby řešeny nezávisle na sobě. Popis měření pro translační a rotační pohyb je blíže popsán v následujících kapitolách 5.4.3 a 5.4.4.



Obr. 37 Schéma predikování geometrické přesnosti obrobku [43].

### 6.4.3 Lineární osy svislého soustruhu

Dle zvoleného přístupu metodiky měření a požadavků na parametry měřeného stroje, které byly definovány v předchozích kapitolách, byly vybrány následující přístupy k jejich identifikaci.

V oblasti kontroly a měření lineárních os CNC obráběcích strojů se aplikují přístupy měření dle norem ČSN ISO 230-2, ČSN ISO 230-4 a VDI/DGQ 3441. Přístroje využívané k měření přesnosti najetí do polohy nebo geometrické přesnosti lineárních os lze rozdělit do jednoosých a víceosých měřících postupů. Jako první dostupný přístroj k zjišťování chyb na lineárních osách obráběcího stroje byl zvolen běžně používaný laserinterferometr, pro měření v jedné ose. Ve firmě TOSHULIN je k dispozici laserinterferometr od firmy Renishaw ML10 včetně příslušenství. Druhým přístrojem, kterým firma disponuje je přístroj LaserTracker od firmy API sensors s typovým označením Tracker 3, víceosý měřicí přístroj. Mezi další měřicí vybavení patří hodinky, vodováhy atd. Ty nejsou příliš vhodné pro stanovení chyb v pracovním prostoru, ale v průběhu měření byly uplatněny pro zpětnou kontrolu měření. Ke sledování chování vybraných chyb je nutný zápis těchto veličin z důvodů sběru informací o stroji a dalšímu srovnávání, což konvenční přístroje bez připojení k PC neumožňují.

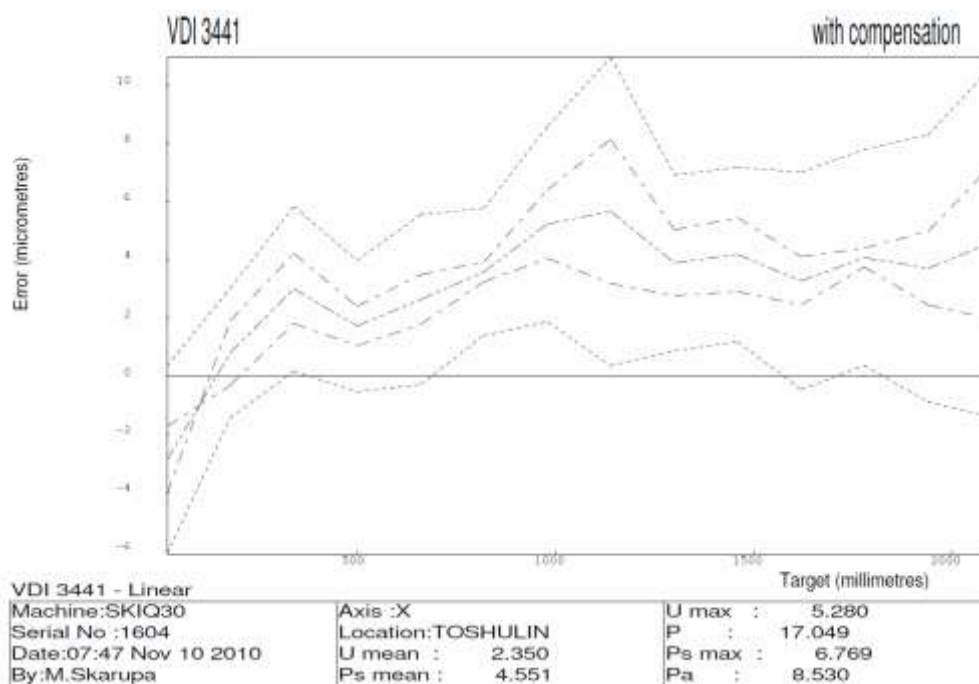
Klasickým způsobem zjišťování přesnosti najetí osy do požadované polohy byla ve spolupráci s panem Škařupem (TOSHULIN) podrobena zkouška osy X, Z, Z1 dle ČSN ISO 230-2 a VDI/DGQ 3441 [30, 31]. Ukázka z výsledků měření je přiložena v příloze 16.4. Jako měřicí přístroj byl zde použit již zmiňovaný Laserinterferometr ML10, který je pro tyto účely běžně nasazován.

Jelikož Laserinterferometr od firmy Renishaw dosahuje vyšší přesnosti, je dále možné použít (nahradit) tyto hodnoty při dosazování do výsledného modelu místo hodnot získaných z měření Laser Trackerem. Jednalo by se pouze o přepsání příslušných sloupců datových souborů. Vhodná by byla především při řešení přesnosti najetí do polohy, tj. kdyby se obrábělo pomocí C-osou, soustružení osazení, atd. Na následujícím obrázku (Obr. 38) je zobrazeno měření přesnosti najetí osy X pomocí Laserinterferometru na zkušebním stroji, svislém soustruhu SQUIK30, v.č. 1604.



Obr. 38 Měření přesnosti najetí do osy X na SKIQ30, v.č. 1604.

Byly změřeny jednotlivé osy X a Z stroje SKIQ30, v.č. 1604 dle VDI 3441. Měření přesnosti najetí do polohy osy X je standardně prováděno v poloze příčnicku (osa Z1) 61 a výsuv smykadla (osa Z) 360 mm (Obr. 39).

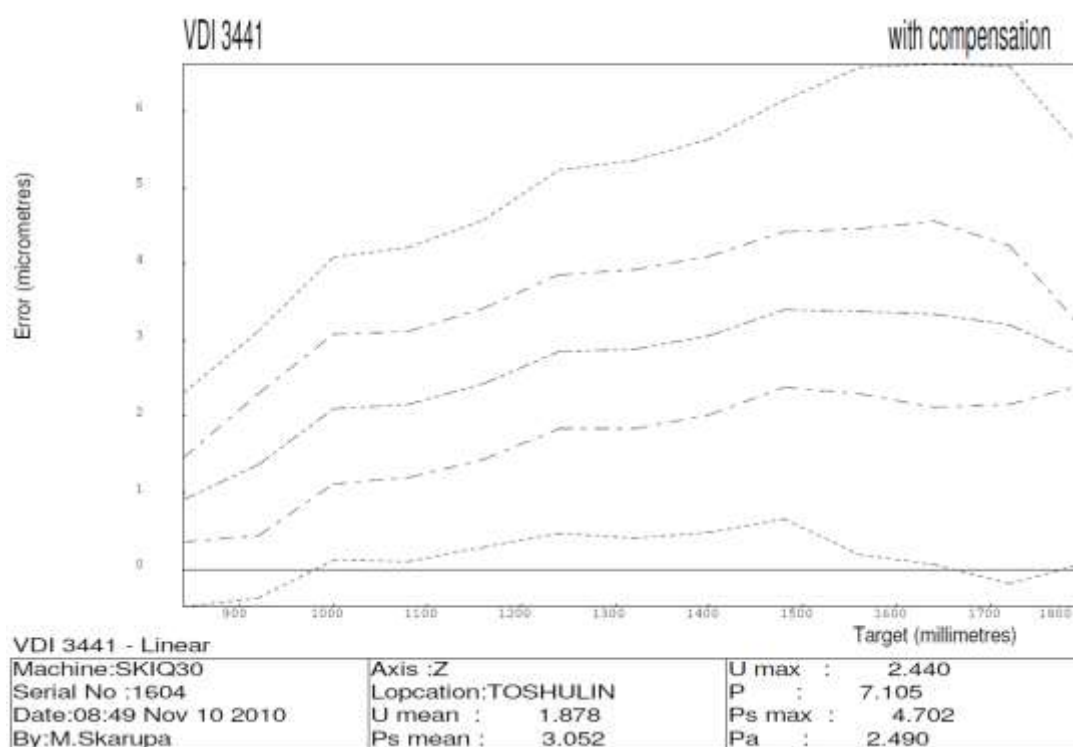


Obr. 39 Výsledek měření přesnosti najetí do osy X na SKIQ30, v.č. 1604.

P vyjadřuje přesnost nastavení polohy v ose X a jeho velikost je 17,049  $\mu\text{m}$  (99,75%).

$$P = \left[ \bar{x}_{ij} + \frac{1}{2}(U_j - P_{sj}) \right]_{\max} - \left[ \bar{x}_{ij} - \frac{1}{2}(U_j - P_{sj}) \right]_{\min} \quad (11).$$

Měření přesnosti najetí do polohy osy Z je standardně prováděno v poloze příčniku (osa Z1) 57 a poloze suportu (osa X) 300 mm (Obr. 40).



Obr. 40 Výsledek měření přesnosti najetí do osy Z na SKIQ30, v.č. 1604.

P vyjadřuje přesnost nastavení polohy v ose Z a jeho velikost je 7,105  $\mu\text{m}$  (99,75%).

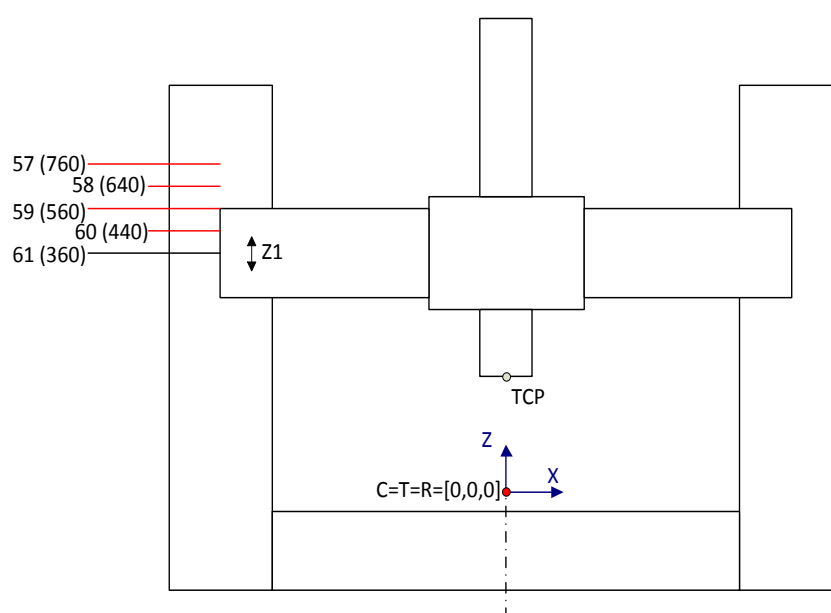
Najetí do požadovaných poloh v ose q, které jsou definovány po krocích 100 mm, byly zjištěny odchylky, které jsou zapsány v následující tabulce.

Tab. 1 Definované polohy příčnicku

| Poloha příčnicku<br>[-] | Velikost zdvihu<br>[mm] | Naměřená hodnota<br>[mm] |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 61                      | 360                     | 0                        |
| 60                      | 440                     | 99,982                   |
| 59                      | 560                     | 199,964                  |
| 58                      | 640                     | 299,958                  |
| 57                      | 760                     | 399,958                  |

Druhá část identifikace geometrických chyb lineárních os byla provedena s přístrojem Laser Tracker 3 od firmy API. Postup měření byl opět zvolen z požadavků na vybraná data potřebná pro další zpracování. První částí stroje pohybující se ještě před samotným obráběním najetí příčnicku (Z1) do předem definované polohy. Poloha je označována 57 - 61, přičemž poloha 61 je nejbližší desce svislého soustruhu, a také zvoleného centrálního souřadného systému C (Obr. 41). K centrálnímu souřadnému systému byly přidruženy souřadný systém rotační desky R a souřadný systém translačních pohybů T. K centrálnímu souřadnému systému budou vztahovány chyby od jednotlivých soustav rotačního a translačního posuvu.

- Návrh měření polohy příčnicku svislého soustruhu



Obr. 41 Schéma principu přestavení osy q.



C... centrální souřadný systém

T... souřadný systém translačních pohybů

R... souřadný systém rotační desky

- Měření polohy suportu a smykadla v automatickém cyklu

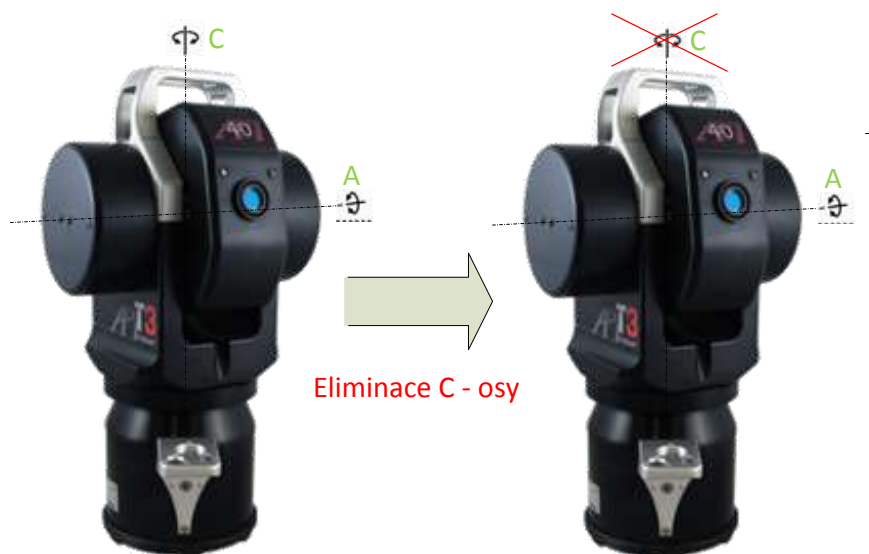
Výchozí poloha TCP pro měření je vždy v zasunutém stavu, tj. nejbližší poloha TCP u suportu. Krok suportu (X) je stanoven na 40 mm a nabývá hodnot  $X = 0\text{--}1640$  mm, přičemž hodnoty 0 nabývá v ose rotační desky. Měření osy Z je ukončeno v nejbližší poloze rotační desky soustruhu. Výsuv smykadla (Z) je dán aktuální polohou příčnicku, přičemž krok v ose Z je také 40 mm (výsuv dle koordinát stroje 1780 – 1020 mm). Velikosti výsuvu TCP je dán následující tabulkou.

**Tab. 2 Velikost výsuvu smykadla pro polohu příčnicku**

| Poloha příčnicku<br>[-] | Min výsuv<br>[mm] | Max. výsuv<br>[mm] | Velikost výsuvu<br>[mm] |
|-------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| 61                      | 1780              | 1420               | 360                     |
| 60                      | 1760              | 1320               | 440                     |
| 59                      | 1780              | 1220               | 560                     |
| 58                      | 1760              | 1120               | 640                     |
| 57                      | 1780              | 1020               | 760                     |

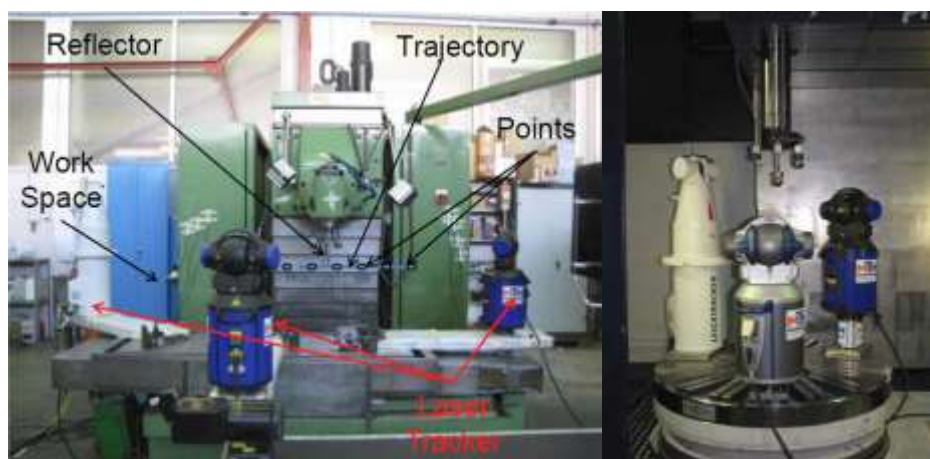
Velikost kroku 40mm byla stanovena po konzultaci s technikem z firmy TOSHULIN. Tato hodnota byla kompromisem mezi dostatečně hustou sítí a dobou potřebnou pro změření sledovaného pracovního prostoru svislého stroje. Z hlediska časové náročnosti měření je provedeno měření pouze v jednom směru a s jedním opakováním. Využito bylo pouze statistické zpracování, které umožňoval software pro API Tracker 3, a to funkce průměrování najeté polohy (počítáno z 50ti nasnímaných hodnot).

Protože Laser Tracker nedosahuje optimální přesnosti pro měření svislého soustruhu, a s každou využívanou osou přístroje roste chyba měření, bylo naplánováno měření tak, aby byly tyto chyby co nejvíce eliminovány. Při snímání 3D pracovního prostoru využívá Tracker dominantní natáčení hlavy ve dvou osách a polohování ve třetí ose (C) je minimalizováno (viz. Obr. 42).



Obr. 42 Princip minimalizace chyb od Laser Trackeru.

Proto bylo zvoleno ustavení kamery a svisléhosoustruhu v jedné rovině. Takovéto uspořádání vyžaduje natočení hlavy pouze v A ose. Tímto krokem byla zvýšená přesnost měřicího zařízení (odzkoušeno v TOSHULIN). Laser Tracker byl ustaven do roviny smykadla, které se pohybuje v osách Z a X. Ustavení Laser Trackeru vůči stroji je zobrazeno na následujícím obrázku. Podložení Trackeru slouží opět k minimalizaci výsledné chyby měření, a to tak, aby osa A se co nejvíce pohybovala kolem vlastní rovnovážné polohy. Zvolený přístup měření svislého soustruhu je možný pouze ve stavu, kdy ještě není namontováno krytování. Využití maximální přesnosti Laser Trackeru, jak bylo popsáno, je omezeno nasazením této metody v plně smontovaném stavu. Je možné Laser Tracker umístit i přímo před svislý soustruh, ale vzhledem k pracovnímu rozsahu jednotlivých os mohou být výsledky měření ovlivněny chybou přístroje.



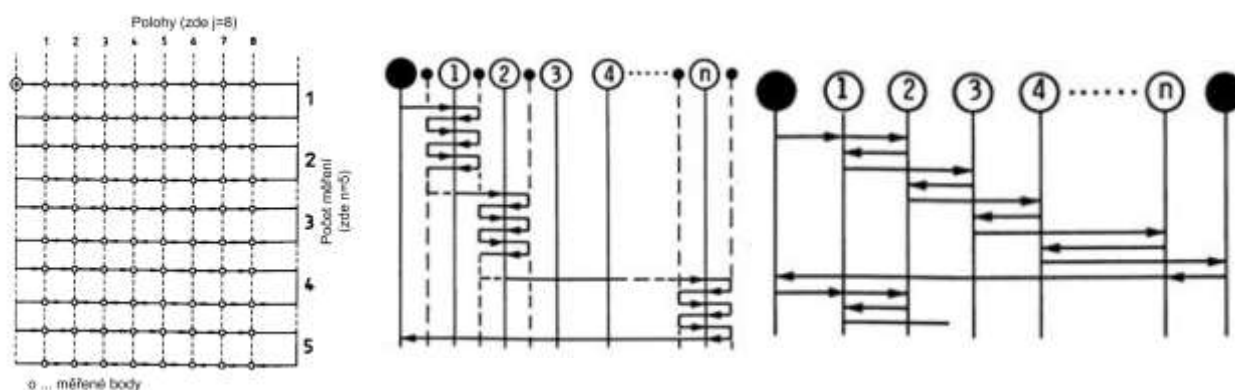
Obr. 43 Vliv polohy Laser Trackeru na výsledné přesnosti [48].

Téma využívání Trackerů v průmyslových aplikacích a jejich potenciál byl prezentován autory Fabra a kol. (Univerzita Zaragoza) na konferenci CIRP 2011, Budapest. Problematika se týkala právě optimalizace polohy Tracekru v pracovním prostoru sledovaného stroje (Obr. 43), přičemž hlavní sledovaný parametr byla výsledná přesnost systému, opakovatelnost a nejistota měření.



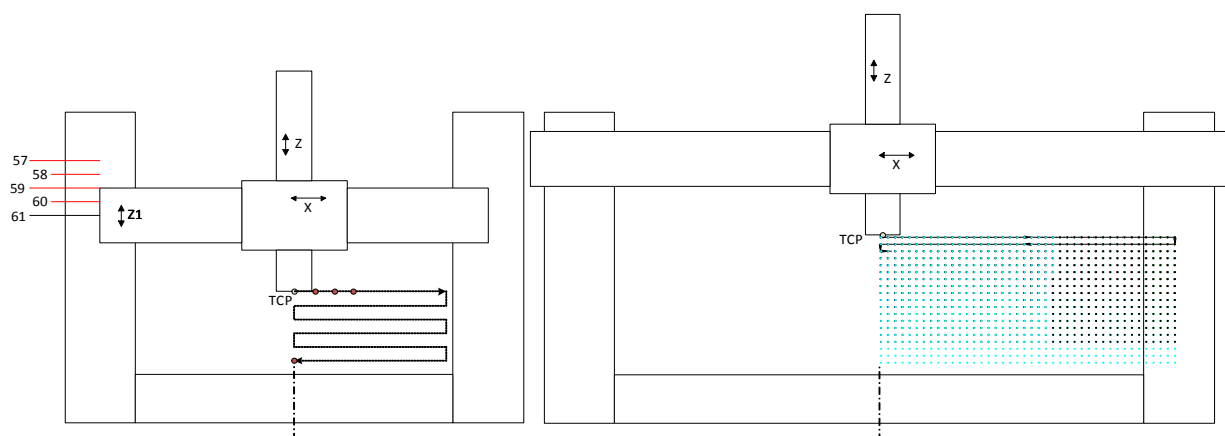
Obr. 44 Ustavení Laser Trackeru vůči SKIQ30.

Postup pohybů jednotlivých os vycházel z normy VDI/DGQ3441, kde je popsán cyklus měření lineárních os (Obr. 45).



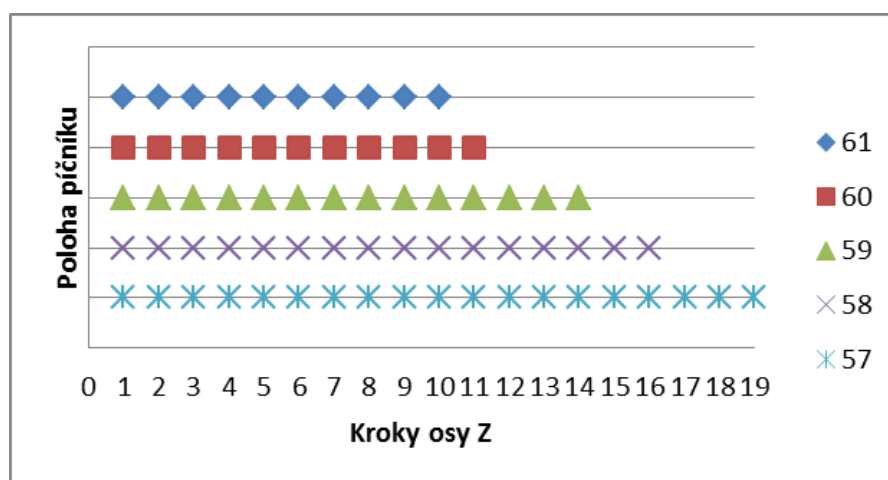
Obr. 45 Standardní zkušební cyklus, cyklus se zpětným krokem, cyklus s kyvadlovým krokem [30].

Jak již bylo řečeno, měření proběhlo pouze v jednom směru a to bez opakování. Tímto postupem měření bylo získáno dostatečné množství informací pro další statistické vyhodnocení najetí osy do polohy a možnosti zanedbat do výsledků chyby opakovatelnosti, vůli ve šroubech, tuhost pohonů, atd. Jelikož se jedná o první měření na svislém soustruhu tohoto typu a nejsou s ním žádné zkušenosti, byla zvolena hustá síť měřených bodů. Důsledkem je, jak již bylo řečeno, vysoký požadavek na dobu potřebnou k samotnému měření. Pokud by se prokázalo, že se může krok dvojnásobně, popř. vícenásobně zvětšit, bylo by možné v rámci úspory času provést měření opakovaně pro každý bod, popř. v obou směrech.



Obr. 46 Schéma najíždění q, Z, X při měření Laser Trackerem, síť měřených bodů.

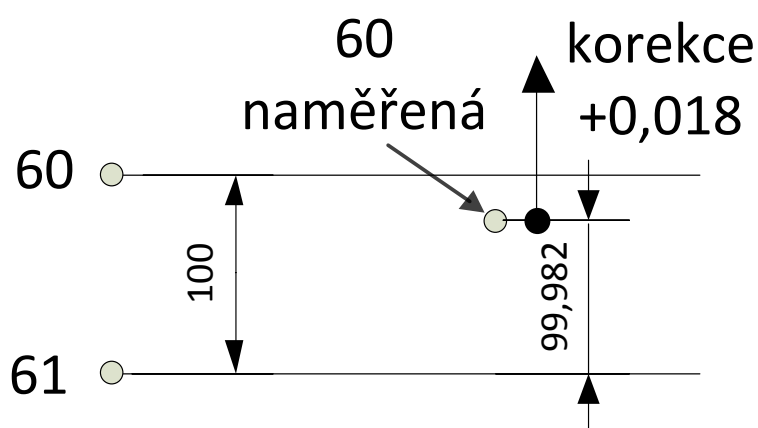
Na obrázku je znázorněna hustota měřených bodů lineárních pohybů nástroje v pracovním prostoru svislého soustruhu. Celkový počet bodů sestavené sítě se ohybuje okolo hodnoty 2800, přičemž každý naměřený bod se skládá z dalších třech složek představujících chybu pro danou osu (x, y, z).



Obr. 47 Počet poloh v ose Z při polohách příčniku q.

Dalším parametrem, který by mohl vypovídat o opakovatelnosti najetí do polohy, je sledování bodů, které se v rámci přesunutí příčnicku překrývají. Na grafu (Obr. 47) je znázorněn počet kroků vysunutí smykadla svislého soustruhu (1-19) na poloze příčnicku (57-61). Zde se pro všechny polohy příčnicku překrývá 10 poloh smykadla. Překrývání bodů a jejich odchylek bude statisticky zpracováno, např. budou sledovány odchylky v ose X pro polohy příčnicku 57 a 58, atd.

Jelikož je při měření Laser Trackerem odečítána absolutní hodnota vzhledem k jeho souřadnému systému, je nutné brát v úvahu chyby, které vznikají najetím do všech poloh ze strany příčnicku (vzhledem k výchozí poloze měření příčnicku 61). Pro každou měřenou hodnotu bude proveden přepočet dle příslušné korekce (viz. Obr. 48).

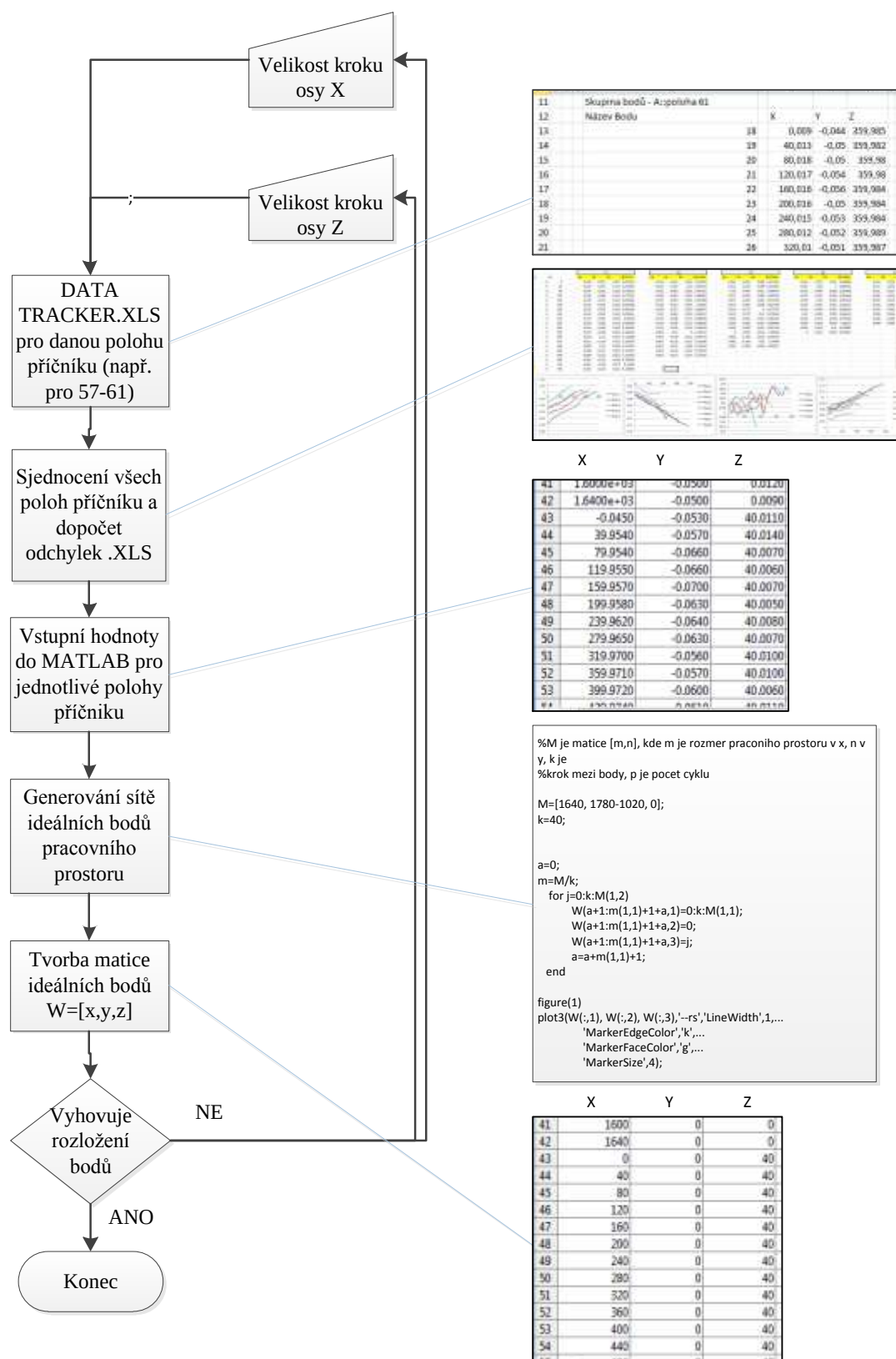


Obr. 48 Princip korekce měřených bodů.

Pro zkoumaný pracovní prostor, který by měl v zásadě odpovídat velikosti budoucího obrobku zákazníka, je v prvním kroku generována matice ideálních bodů pracovního prostoru s vhodně zvolenými velikostmi kroku os X a Z (viz. Obr. 49). V ideálním případě by se měly překrývat ideální body sítě s hranami budoucího obrobku.

Zde je kritickým bodem volba velikostí kroku a pracovního pojezdu příčnicku, který má definovaný posuv v ose Z1 po 100mm a nemusela by vždy odpovídat nastavení. Proto bude v dalším kroku návrhu provedena kontrola, kde je možné provést proložení mezi dvěma, popř. několika známými body a dopočítání potřebné souřadnice. Tento důsledek je vyvozen z požadavků na kontrolu každého stroje a tím potřebnou standardizaci pro navrhovanou metodiku měření svislých soustruhů.

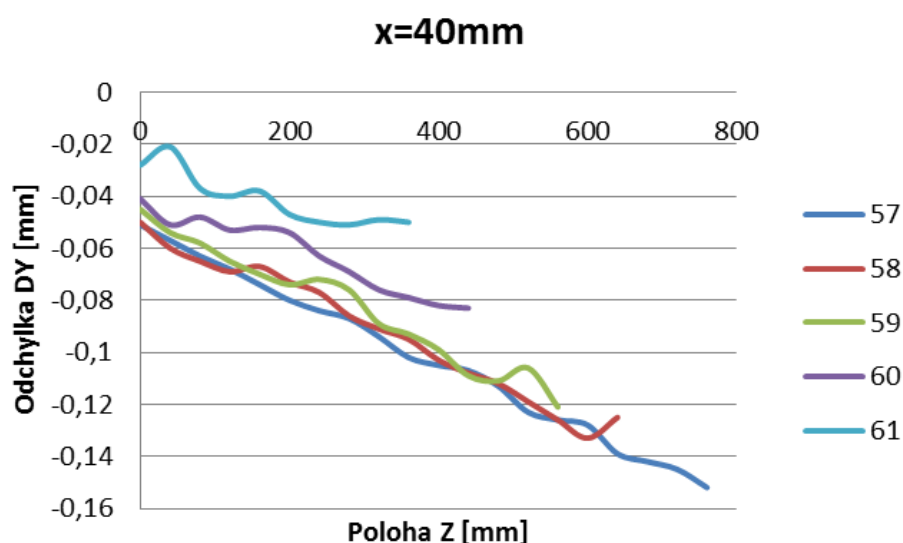
## Vliv geometrické přesnosti vybraných obráběcích center na požadované vlastnosti výrobků



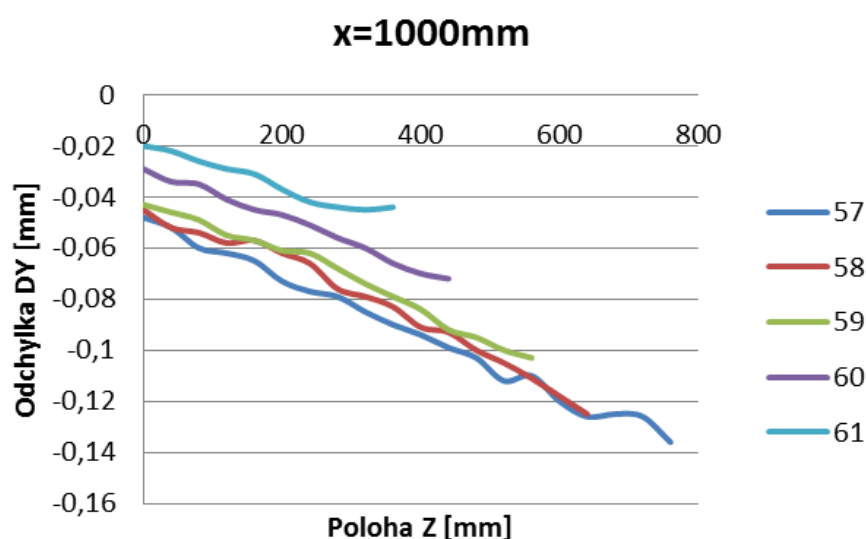
Obr. 49 Postup při zpracování dat z Laser Trackeru.



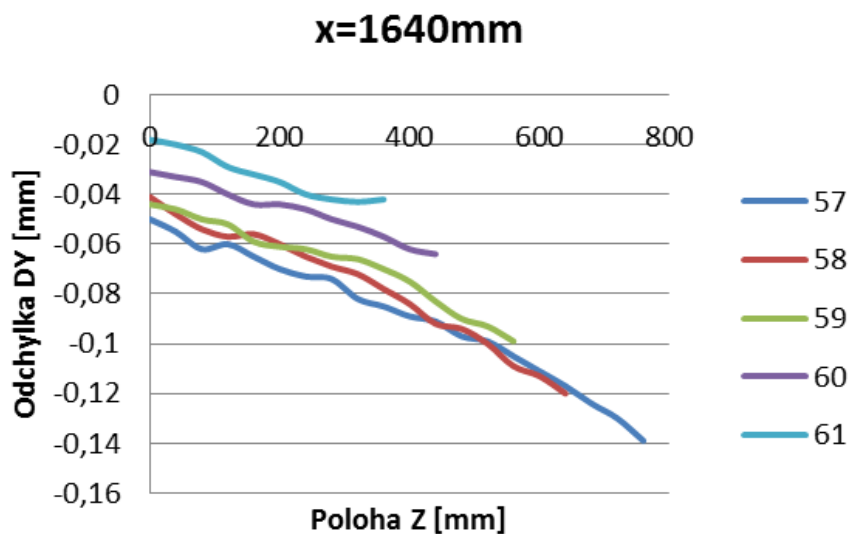
Z takto připravených vstupních dat z měření budou dále zpracovány informace o chování stroje. Ze zpracovaných dat jsou sledovány natáčení TCP kolem osy X, Y a Z. Z obrázků jsou patrné závislosti na výsuvu smykadla, poloze příčnicku a natočení kolem osy X. Nejmenší odchylka je při maximálním vysunutí smykadla a se zasunutím odchylka v Y roste. Jako ukázky byly vybrány polohy smykadla v ose X = 40 mm, X = 1 000 mm, X = 1 640 mm, Z = 80 mm, Z = 360 mm a Z = 760 mm (Obr. 50 až Obr. 55).



Obr. 50 Závislost výsuvu smykadla na poloze suportu X = 40 mm.

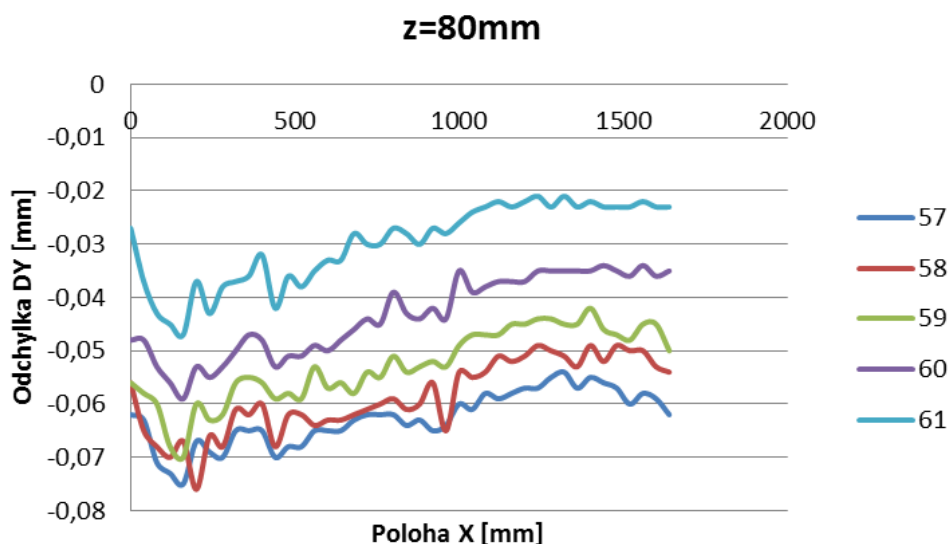


Obr. 51 Závislost výsuvu smykadla na poloze suportu X = 1 000 mm.



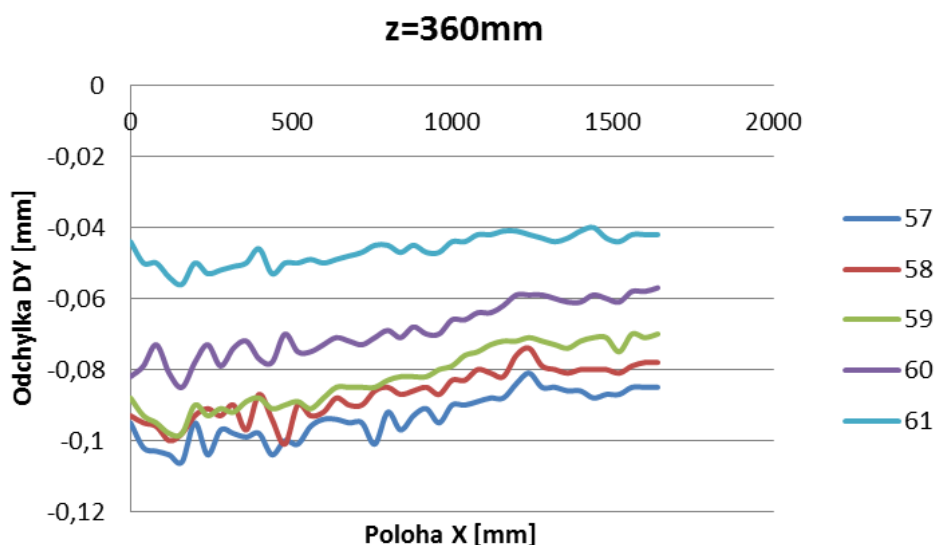
Obr. 52 Závislost výsuvu smykadla na poloze suportu X = 1 640 mm.

Nastavení polohy smykadla v definované poloze Z a pojezd suportu v ose X po příčniku v rozsahu 0 – 1 640 mm.

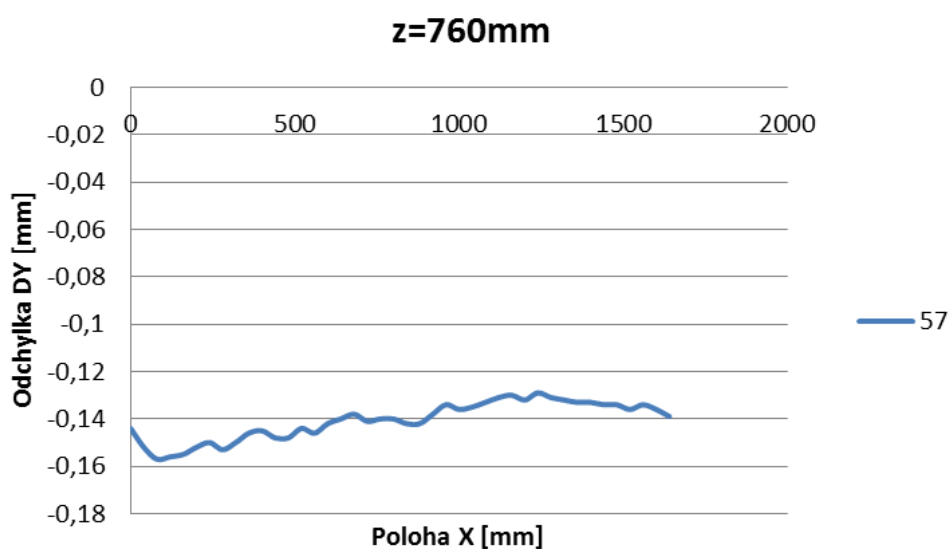


Obr. 53 Závislost pohybu suportu na výsuvu smykadla Z = 80 mm.





Obr. 54 Závislost pohybu suportu na výsuvu smykadla Z = 360 mm.



Obr. 55 Závislost pohybu suportu na výsuvu smykadla Z = 760 mm.

### ***Zpracování naměřených dat***

Naměřená data byla zpracována tak, aby bylo možné predikovat chování jednotlivých částí zkušebního stroje a tyto získané údaje dál zpracovávat pro budoucí srovnávání svislých soustruhů. Tabulka byla převedena na společný základ, který tvoří pořadí měření a je určen koordináty najetí TCP do X, Y, Z (viz. Obr. 56). Hodnoty sestavené tabulky s prvními 54 hodnotami jsou přiloženy v příloze 16.5.

## Vliv geometrické přesnosti vybraných obráběcích center na požadované vlastnosti výrobků

| A     | B   | C | D | E      | F      | G      | H        | I       | J      | K     | L        | M       | N      | O     | P        | Q       | R      | S      | T        | U       | V      | W      | X        |         |
|-------|-----|---|---|--------|--------|--------|----------|---------|--------|-------|----------|---------|--------|-------|----------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|--------|----------|---------|
| Prvek | A   | B | C | D      | DX57   | DY57   | DZ57     | DELTA57 | DX58   | DY58  | DZ58     | DELTA58 | DX59   | DY59  | DZ59     | DELTA59 | DX60   | DY60   | DZ60     | DELTA60 | DX61   | DY61   | DZ61     | DELTA61 |
| 1     | 0   | 0 | 0 | -0,048 | -0,047 | 0,007  | 0,087945 | -0,032  | -0,041 | 0,004 | 0,052163 | -0,034  | -0,043 | 0,008 | 0,051634 | -0,038  | -0,035 | -0,001 | 0,048885 | -0,016  | -0,024 | 0,004  | 0,02912  |         |
| 2     | 40  | 0 | 0 | -0,049 | -0,051 | 0,006  | 0,071176 | -0,033  | -0,028 | 0,009 | 0,060561 | -0,034  | -0,043 | 0,01  | 0,051571 | -0,025  | -0,041 | -0,003 | 0,048134 | -0,014  | -0,028 | 0,004  | 0,031359 |         |
| 3     | 80  | 0 | 0 | -0,049 | -0,05  | 0,001  | 0,077473 | -0,033  | -0,029 | 0     | 0,067602 | -0,032  | -0,038 | 0,001 | 0,062094 | -0,022  | -0,04  | -0,017 | 0,048713 | -0,013  | -0,036 | -0,004 | 0,033404 |         |
| 4     | 120 | 0 | 0 | -0,047 | -0,059 | -0,002 | 0,075459 | -0,032  | -0,062 | 0,002 | 0,0698   | -0,032  | -0,057 | 0,001 | 0,061186 | -0,034  | -0,047 | -0,009 | 0,051525 | -0,013  | -0,037 | -0,002 | 0,029268 |         |
| 5     | 160 | 0 | 0 | -0,044 | -0,061 | 0,001  | 0,07522  | -0,029  | -0,061 | 0,007 | 0,067904 | -0,03   | -0,056 | 0,005 | 0,059674 | -0,034  | -0,049 | -0,007 | 0,055099 | -0,014  | -0,038 | 0      | 0,043697 |         |
| 6     | 190 | 0 | 0 | -0,044 | -0,061 | 0,006  | 0,075452 | -0,028  | -0,056 | 0,007 | 0,063    | -0,03   | -0,052 | 0,009 | 0,056436 | -0,033  | -0,046 | -0,009 | 0,052211 | -0,019  | -0,034 | -0,001 | 0,038414 |         |
| 7     | 240 | 0 | 0 | -0,04  | -0,059 | 0,006  | 0,075535 | -0,025  | -0,058 | 0,011 | 0,064109 | -0,018  | -0,048 | 0,009 | 0,052844 | -0,022  | -0,041 | -0,002 | 0,046575 | -0,013  | -0,034 | 0,004  | 0,03662  |         |
| 8     | 280 | 0 | 0 | -0,038 | -0,058 | 0,006  | 0,069599 | -0,024  | -0,057 | 0,008 | 0,062362 | -0,018  | -0,051 | 0,005 | 0,055588 | -0,021  | -0,042 | -0,009 | 0,045329 | -0,012  | -0,031 | 0,001  | 0,031257 |         |
| 9     | 320 | 0 | 0 | -0,035 | -0,053 | 0,008  | 0,062944 | -0,021  | -0,053 | 0,01  | 0,057679 | -0,015  | -0,047 | 0,008 | 0,04998  | -0,018  | -0,039 | -0,004 | 0,043129 | -0,012  | -0,028 | 0,008  | 0,031496 |         |
| 10    | 360 | 0 | 0 | -0,03  | -0,048 | 0,006  | 0,058923 | -0,019  | -0,05  | 0,01  | 0,054415 | -0,013  | -0,043 | 0,007 | 0,04738  | -0,019  | -0,038 | -0,004 | 0,040902 | -0,013  | -0,029 | 0,008  | 0,032772 |         |
| 11    | 400 | 0 | 0 | -0,03  | -0,05  | 0,006  | 0,058617 | -0,017  | -0,05  | 0,008 | 0,053572 | -0,013  | -0,04  | 0,006 | 0,043817 | -0,018  | -0,034 | -0,006 | 0,038926 | -0,012  | -0,026 | 0,004  | 0,028914 |         |
| 12    | 440 | 0 | 0 | -0,028 | -0,055 | 0,006  | 0,063006 | -0,015  | -0,055 | 0,01  | 0,057879 | -0,009  | -0,048 | 0,006 | 0,047255 | -0,025  | -0,042 | -0,008 | 0,04521  | -0,01   | -0,03  | 0,006  | 0,032187 |         |
| 13    | 480 | 0 | 0 | -0,026 | -0,057 | 0,01   | 0,063566 | -0,015  | -0,056 | 0,013 | 0,060906 | -0,009  | -0,053 | 0,006 | 0,046854 | -0,025  | -0,043 | -0,008 | 0,043841 | -0,01   | -0,034 | 0,007  | 0,033536 |         |

| A   | B    | C | D   | E      | F      | G     | H        | I      | J      | K     | L        | M     | N      | O     | P        | Q     | R      | S     | T        |
|-----|------|---|-----|--------|--------|-------|----------|--------|--------|-------|----------|-------|--------|-------|----------|-------|--------|-------|----------|
| 501 | 1520 | 0 | 440 | 0,018  | 0,092  | 0,018 | 0,093457 | 0,021  | -0,093 | 0,013 | 0,096224 | 0,024 | -0,096 | 0,014 | 0,096077 | 0,021 | -0,096 | 0,013 | 0,09     |
| 502 | 1560 | 0 | 440 | 0,016  | -0,093 | 0,019 | 0,090615 | 0,02   | -0,092 | 0,013 | 0,090336 | 0,02  | -0,094 | 0,013 | 0,090384 | 0,008 | -0,093 | 0,013 | 0,087186 |
| 503 | 1600 | 0 | 440 | 0,018  | -0,094 | 0,019 | 0,087576 | 0,02   | -0,094 | 0,013 | 0,087266 | 0,022 | -0,093 | 0,017 | 0,087533 | 0,009 | -0,094 | 0,014 | 0,086129 |
| 504 | 1640 | 0 | 440 | 0,02   | -0,091 | 0,021 | 0,085509 | 0,023  | -0,092 | 0,011 | 0,085467 | 0,024 | -0,091 | 0,014 | 0,087527 | 0,022 | -0,094 | 0,011 | 0,086038 |
| 505 | 0    | 0 | 480 | -0,018 | -0,11  | 0,015 | 0,112468 | -0,005 | -0,109 | 0,012 | 0,109772 | 0,002 | -0,109 | 0,014 | 0,109924 |       |        |       |          |
| 506 | 40   | 0 | 480 | -0,016 | -0,113 | 0,015 | 0,115109 | -0,003 | -0,112 | 0,013 | 0,112762 | 0,005 | -0,113 | 0,014 | 0,111981 |       |        |       |          |
| 507 | 80   | 0 | 480 | -0,012 | -0,117 | 0,01  | 0,118038 | 0,001  | -0,116 | 0,008 | 0,11628  | 0,013 | -0,114 | 0,008 | 0,114889 |       |        |       |          |
| 508 | 120  | 0 | 480 | -0,015 | -0,118 | 0,012 | 0,118319 | 0      | -0,115 | 0,009 | 0,115352 | 0,01  | -0,113 | 0,007 | 0,113697 |       |        |       |          |
| 509 | 160  | 0 | 480 | -0,011 | -0,108 | 0,012 | 0,109022 | 0,002  | -0,116 | 0,006 | 0,110293 | 0,008 | -0,112 | 0,004 | 0,111436 |       |        |       |          |
| 510 | 200  | 0 | 480 | -0,012 | -0,126 | 0,006 | 0,128712 | 0,001  | -0,117 | 0,011 | 0,11752  | 0,009 | -0,11  | 0,006 | 0,110531 |       |        |       |          |
| 511 | 240  | 0 | 480 | -0,01  | -0,115 | 0,009 | 0,115794 | 0,002  | -0,112 | 0,008 | 0,113303 | 0,008 | -0,113 | 0,008 | 0,113357 |       |        |       |          |

| A   | B    | C | D   | E      | F      | G     | H        | I     | J      | K     | L        |
|-----|------|---|-----|--------|--------|-------|----------|-------|--------|-------|----------|
| 700 | 1400 | 0 | 640 | 0,023  | -0,123 | 0,018 | 0,122532 | 0,02  | -0,123 | 0,01  | 0,124032 |
| 709 | 1440 | 0 | 640 | 0,018  | -0,118 | 0,021 | 0,122662 | 0,024 | -0,121 | 0,005 | 0,123438 |
| 710 | 1480 | 0 | 640 | 0,028  | -0,114 | 0,018 | 0,118474 | 0,025 | -0,12  | 0,006 | 0,122729 |
| 711 | 1520 | 0 | 640 | 0,024  | -0,118 | 0,019 | 0,122115 | 0,029 | -0,12  | 0,006 | 0,122332 |
| 712 | 1560 | 0 | 640 | 0,024  | -0,118 | 0,014 | 0,120964 | 0,019 | -0,121 | 0,014 | 0,123208 |
| 713 | 1600 | 0 | 640 | 0,024  | -0,123 | 0,019 | 0,119004 | 0,02  | -0,119 | 0,01  | 0,123983 |
| 714 | 1640 | 0 | 640 | 0,028  | -0,117 | 0,019 | 0,121795 | 0,023 | -0,12  | 0,011 | 0,123378 |
| 715 | 0    | 0 | 680 | -0,062 | -0,125 | 0,018 | 0,126209 |       |        |       |          |
| 716 | 40   | 0 | 680 | 0,061  | -0,142 | 0,014 | 0,142662 |       |        |       |          |
| 717 | 80   | 0 | 680 | 0,099  | -0,144 | 0,02  | 0,146465 |       |        |       |          |
| 718 | 120  | 0 | 680 | 0,064  | -0,142 | 0,004 | 0,142115 |       |        |       |          |

| A   | B    | C | D   | E     | F      | G     | H        |
|-----|------|---|-----|-------|--------|-------|----------|
| 826 | 1280 | 0 | 760 | 0,02  | -0,12  | 0,012 | 0,132217 |
| 829 | 1320 | 0 | 760 | 0,029 | -0,112 | 0,01  | 0,133713 |
| 830 | 1340 | 0 | 760 | 0,02  | -0,129 | 0,011 | 0,131604 |
| 831 | 1280 | 0 | 760 | 0,022 | -0,121 | 0,009 | 0,133339 |
| 832 | 1320 | 0 | 760 | 0,021 | -0,112 | 0,011 | 0,134122 |
| 833 | 1360 | 0 | 760 | 0,02  | -0,111 | 0,012 | 0,13563  |
| 834 | 1400 | 0 | 760 | 0,022 | -0,113 | 0,015 | 0,135639 |
| 835 | 1440 | 0 | 760 | 0,028 | -0,124 | 0,015 | 0,137523 |
| 836 | 1480 | 0 | 760 | 0,029 | -0,124 | 0,015 | 0,13752  |
| 837 | 1520 | 0 | 760 | 0,026 | -0,118 | 0,019 | 0,139761 |
| 838 | 1560 | 0 | 760 | 0,023 | -0,134 | 0,023 | 0,137951 |
| 839 | 1600 | 0 | 760 | 0,023 | -0,126 | 0,021 | 0,139522 |
| 840 | 1640 | 0 | 760 | 0,029 | -0,128 | 0,022 | 0,140687 |

Obr. 56 Zpracovaná data z měření pro statistické vyhodnocení.

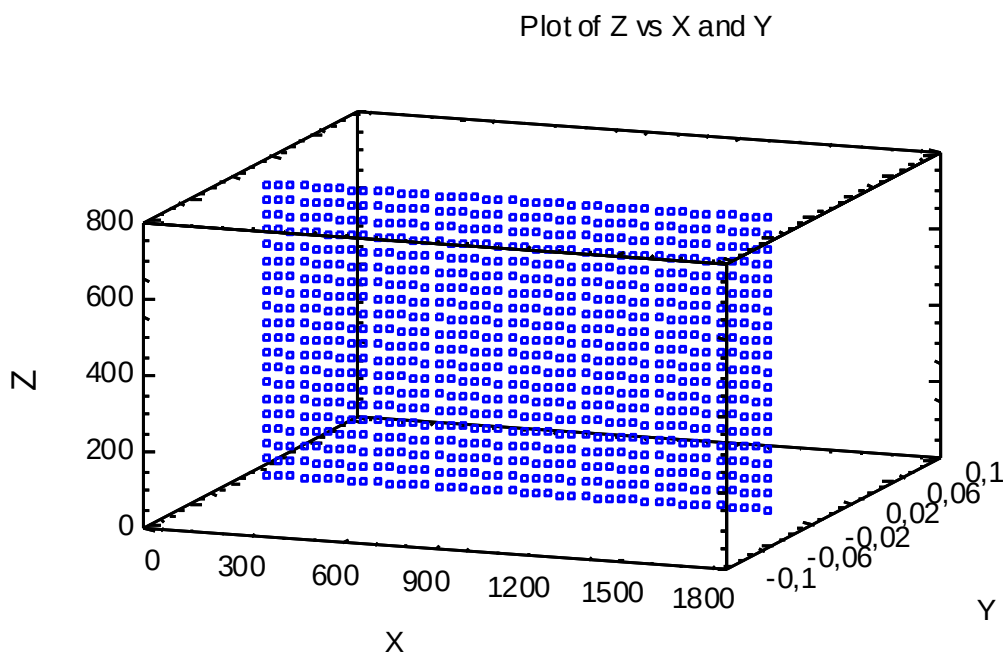
Jednotlivé chyby jsou definovány odchylkou v příslušném směru a polohou příčnicku např. chyba vzniklá v ose X a při poloze příčnicku 57 je v tabulkách definována jako DX57 apod. Dále zde byla definována odchylka DELTA57, která je dána vztahem:

$$DELTA57 = \sqrt{DX57^2 + DY57^2 + DZ57^2} \quad (12).$$

Vypovídá o celkovém trendu chování chyby na poloze příčnicku. Taktéž jsou analogicky definovány chyby DELTA58, DELTA59, DELTA60 a DELTA61.

Jako ukázkový příklad zde budou zobrazeny výsledky pro měření v poloze příčnicku 57, které obsahují nejvíce měřených bodů pracovního prostoru translačního pohybu.

Na Obr. 57 je znázorněna síť zpracovaných hodnot dle tabulky na Obr. 56 pro polohu příčnicku 57. Pro představenou síť bodů byly dále vygenerovány funkce ze statistického zpracování pro jednotlivé odchylky DX, DY, DZ. Tyto funkce budou predikovat chování testovaného stroje. Veškeré statistické výpočty byly provedeny v softwarech Minitab a Statgraphics a grafické výstupy odpovídají značení těmito softwarům (všechny osy vzdáleností v následujících grafech odpovídají rozměru mm).



Obr. 57 Síť zpracovaných bodů.

V příloze 16.6 jsou zobrazeny závislosti odchylek DX57, DY57, DZ57 a DELTA57 na pořadí a dále predikce chyby DELTA57.

Pro popis chování TCP v pracovním procesu jednotlivých os byly podrobeny statistické analýze následující posuvy TCP. Při nastavení suportu do definované polohy a výsuv smykadla:

- X = 320 mm

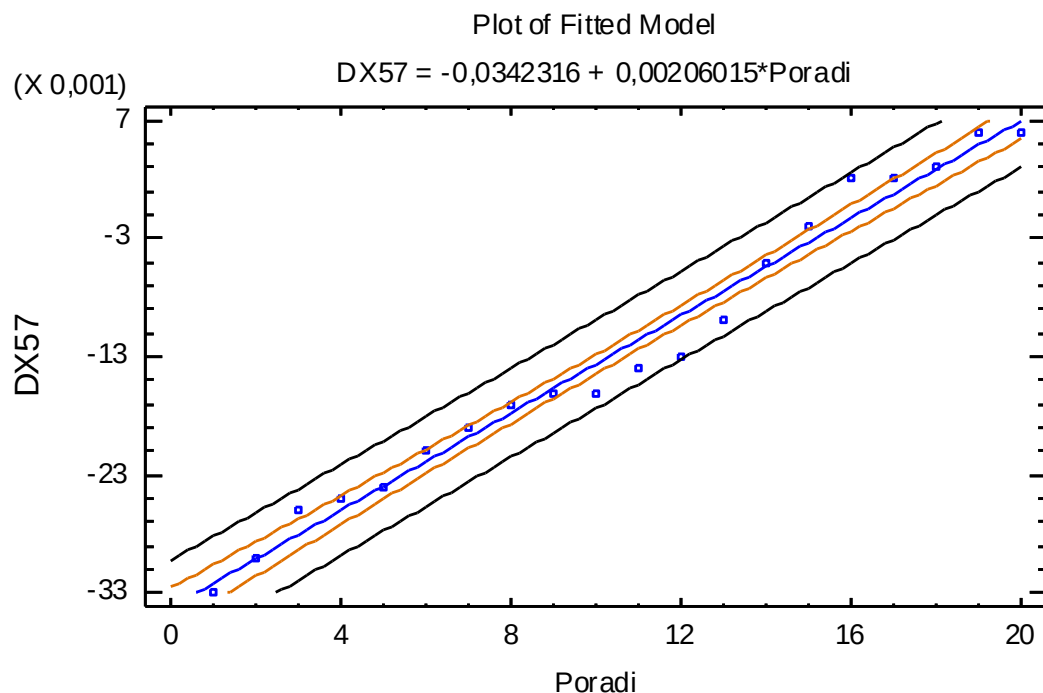
- $X = 1\,000\text{ mm}$
- $X = 1\,640\text{ mm}$

Pro vyhodnocení vodorovného pohybu a predikování odchylek byly zvoleny pevné polohy smykadla s pohybem suportu:

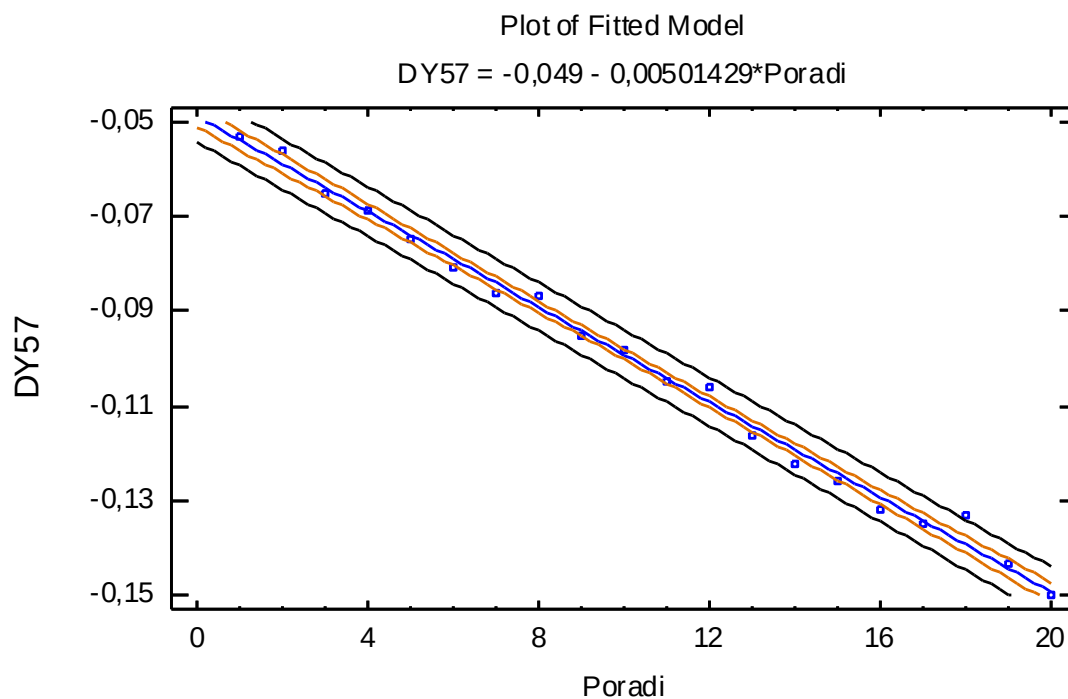
- $Z = 80\text{ mm}$
- $Z = 360\text{ mm}$
- $Z = 760\text{ mm}$

Při svislém pohybu, tedy výsuvu smykadla byly vyhodnoceny odchylky DX a DY. U vodorovného pohybu se jednalo o odchylky DY a DZ. V následujících obrázcích jsou patrné vyhodnocení, které bylo zpracováno v software Statgraphics.

- **$X = 320\text{ mm}$**

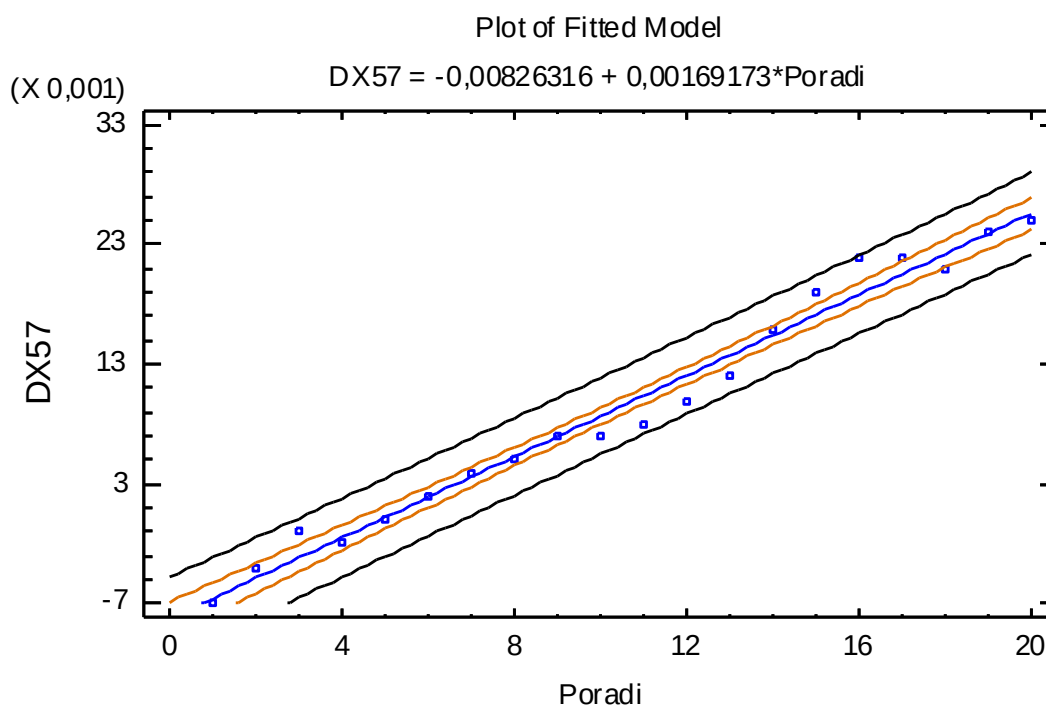


Obr. 58 Predikce odchylky DX při posuvu TCP ve směru osy Z.

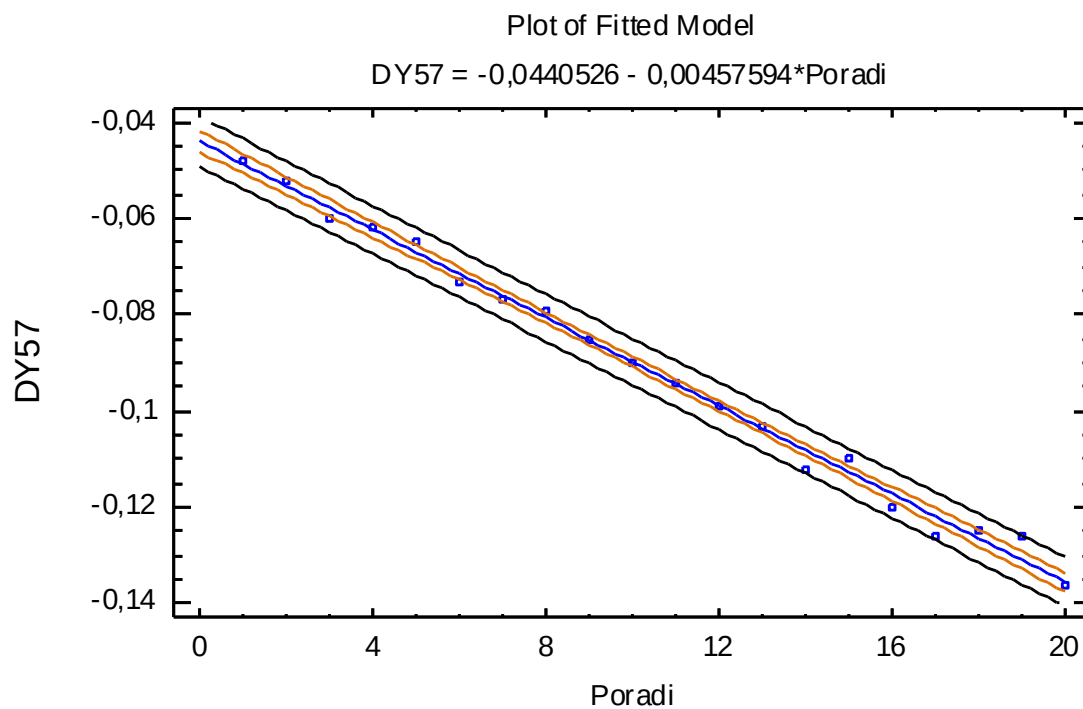


Obr. 59 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy Z.

- **X = 1 000 mm**

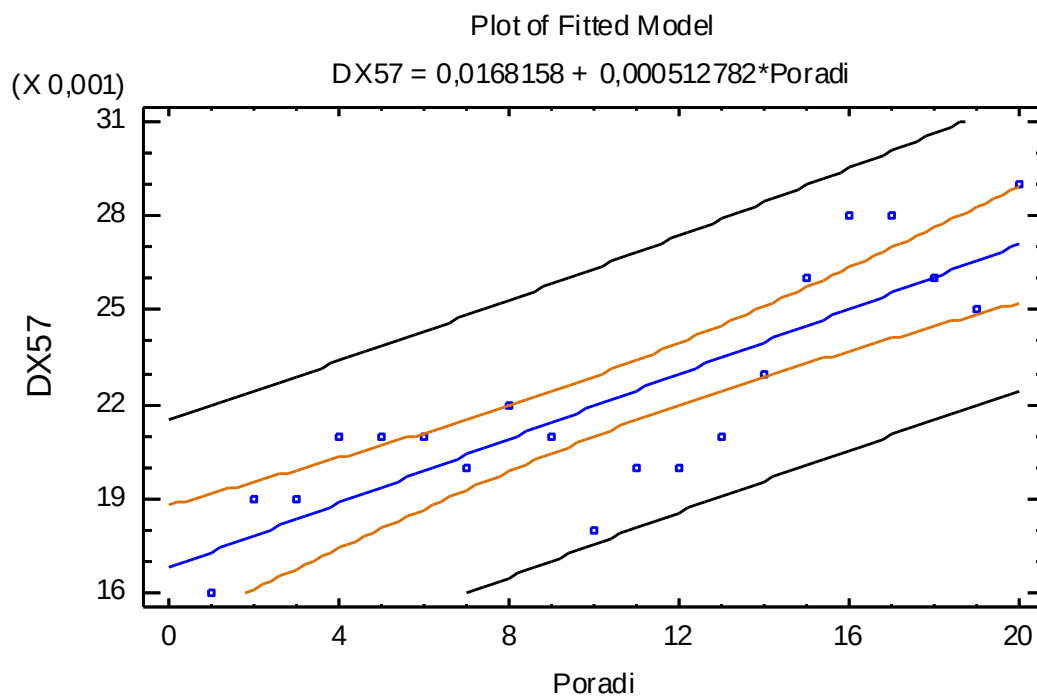


Obr. 60 Predikce odchylky DX při posuvu TCP ve směru osy Z.

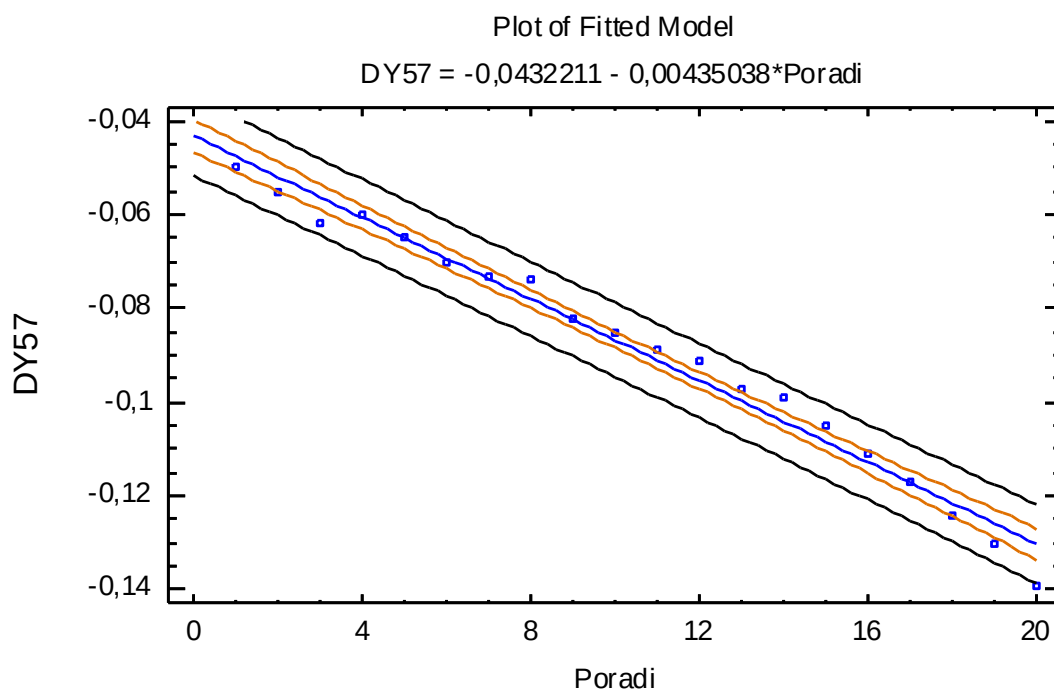


Obr. 61 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy Z.

- **X = 1 640 mm**

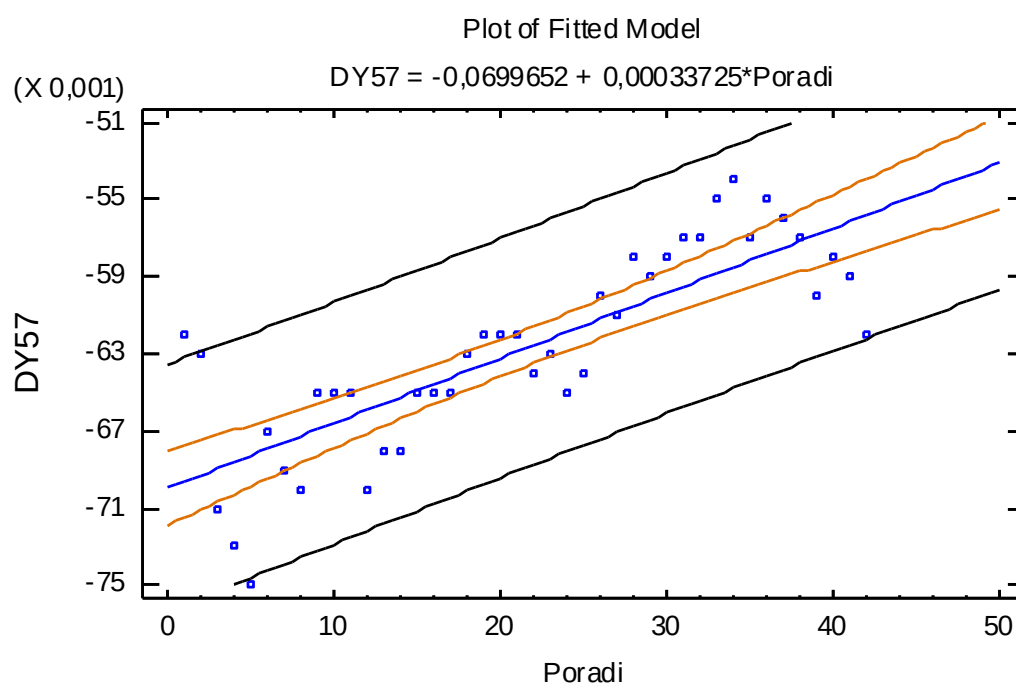


Obr. 62 Predikce odchylky DX při posuvu TCP ve směru osy Z.

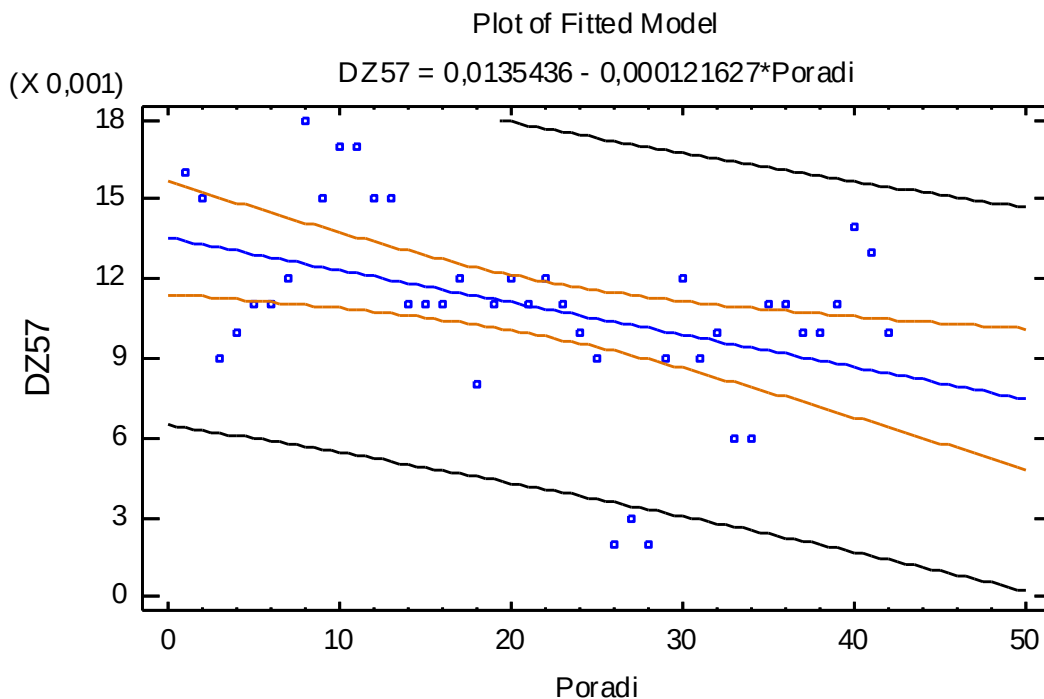


Obr. 63 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy Z.

- **Z = 80 mm**

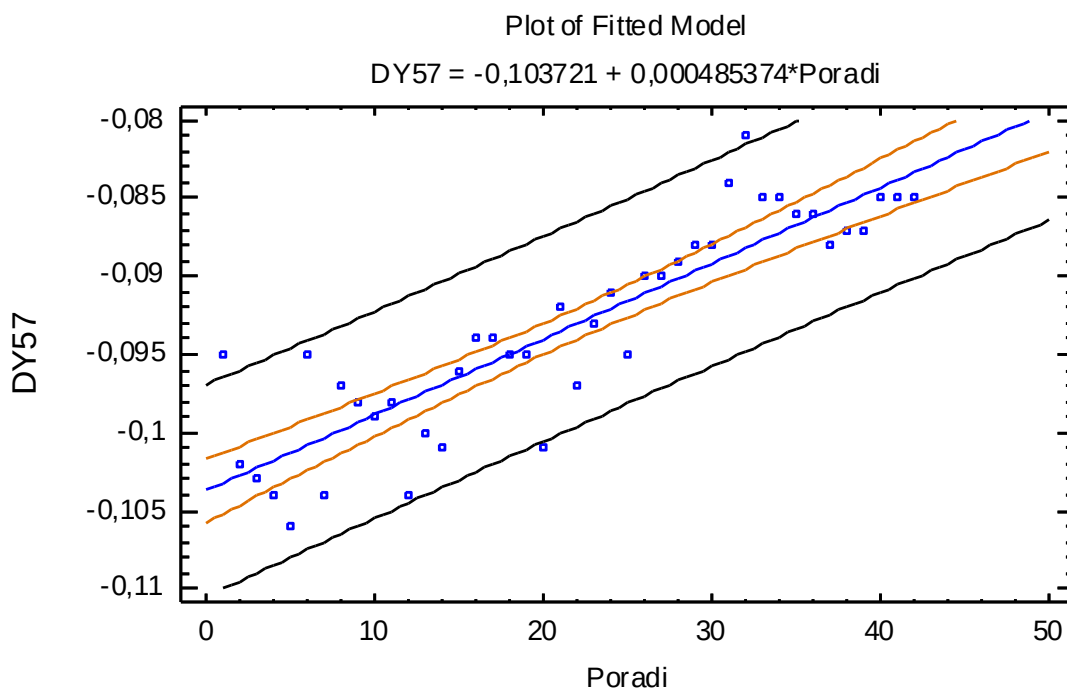


Obr. 64 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy X.



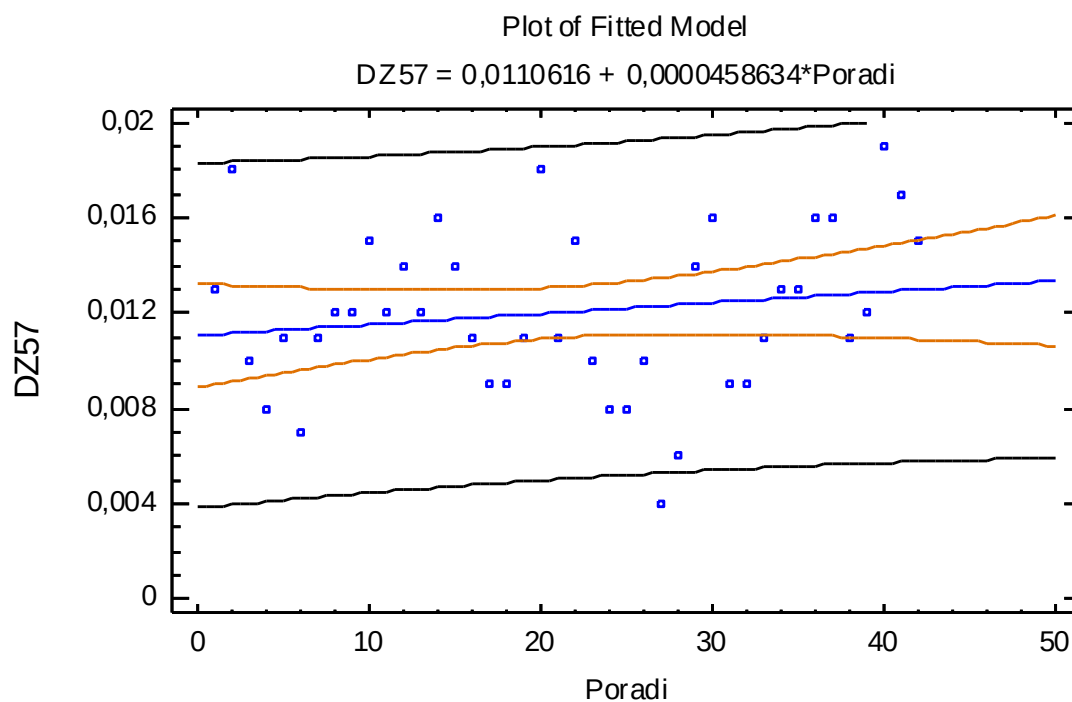
Obr. 65 Predikce odchylky DZ při posuvu TCP ve směru osy X.

- **Z = 360 mm**



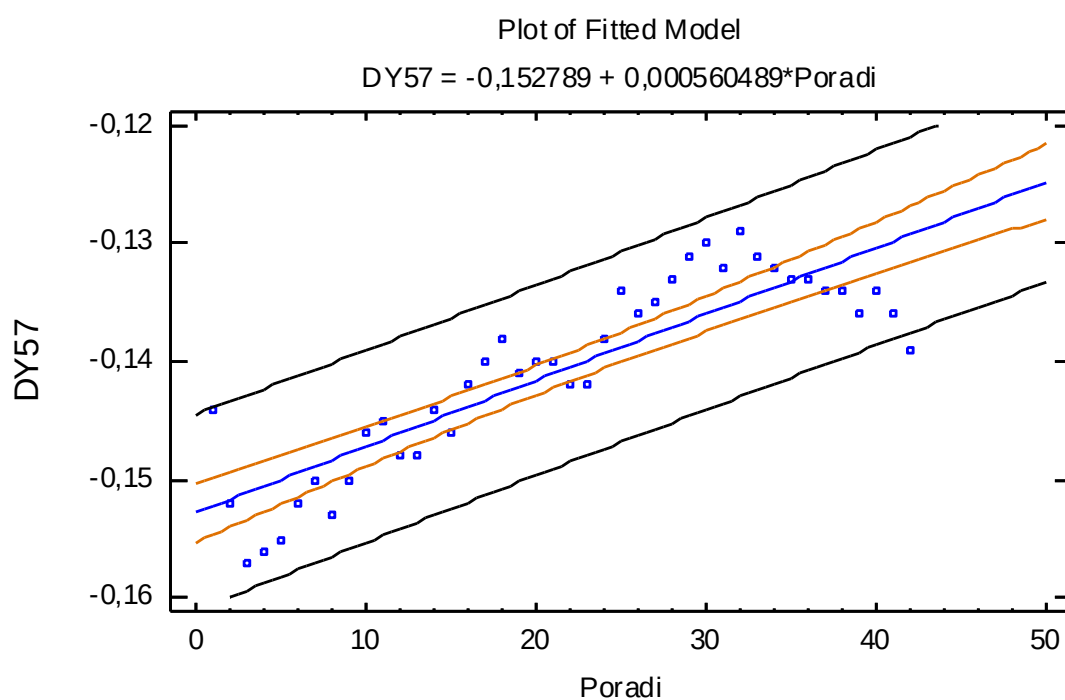
Obr. 66 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy X.



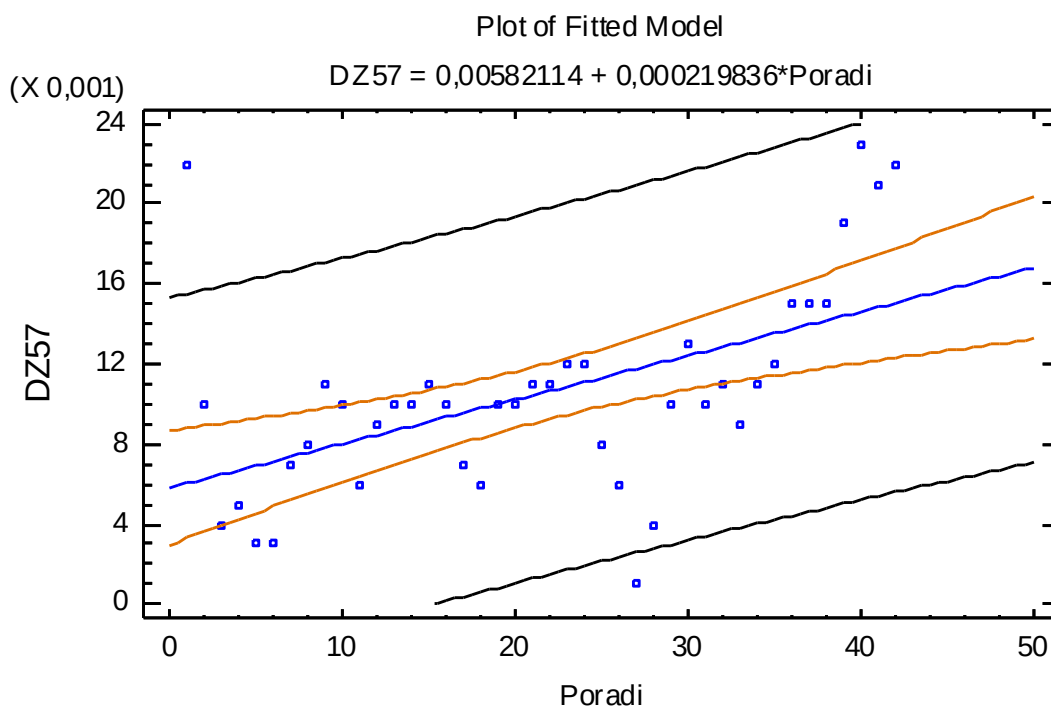


Obr. 67 Predikce odchylky DZ při posuvu TCP ve směru osy X.

- **Z = 760 mm**



Obr. 68 Predikce odchylky DY při posuvu TCP ve směru osy X.



**Obr. 69** Predikce odchylky DZ při posuvu TCP ve směru osy X.

Jak je vidět z jednotlivých grafů, posunutí TCP od ideálního bodu vykazuje závislost ve všech směrech DX, DY a DZ, jak na posuvu suportu v ose x, tak na výsuvu smykadla v ose y. Velikost rozptylu predikovaných hodnot leží v rozsahu daném nejistotou 95%. Vzhledem k požadované přesnosti měření je hodnota rozptylu okolo  $\pm 0,008$  mm vysoká pro predikci vlastností obrobku. Tento jev je možné přisuzovat měřicí aparatuře Laser Tracker, který byl k měření využit.

Současně lze vyvodit závěry, že směry trendů i rozsahy odpovídají reálnému chování stroje a to na základě konzultací s panem Škařupem. Bohužel nebylo možné v rámci řešení dizertační práce tyto výsledky ověřit, a to z důvodů náročnosti na zpracování metodiky měření a předání stroje zákazníkovi do zahraničí.

S ohledem na měřicí aparaturu je možné pro přesnější měření využít přístroje Laser Tracer od firmy Etalon-AG, který by dle dokumentace měl snížit rozptyl o celých 10%.

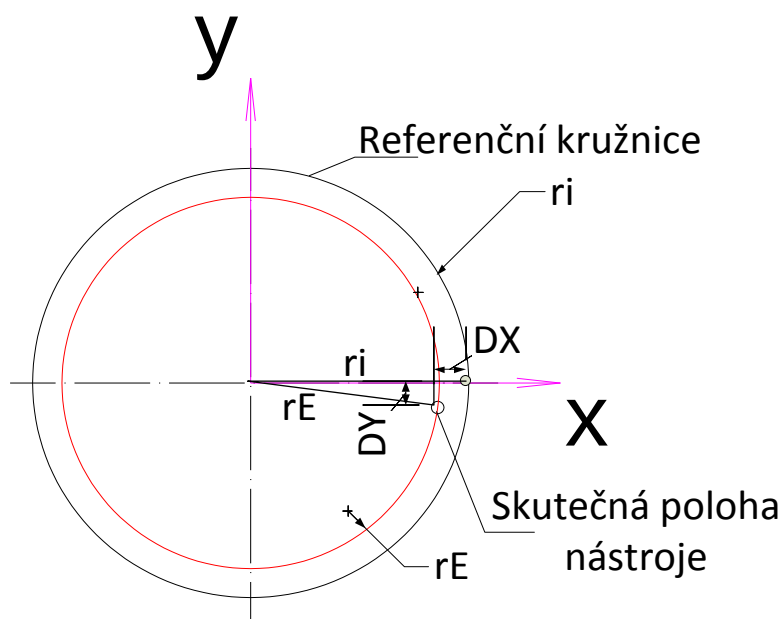
Získané výsledky byly dále použity pro definování chování lineárních os ve vybraných částech stroje. Rovnice popisující chování TCP byly zpracovány na pořadí měření, což bylo obtížné pro další zpracování. Proto je v další části práce řešen průběh chování TCP pouze formou zpracování v softwaru Excel.

**Chyby způsobené pohybem nástroje**

Nyní je možné predikovat chování jednotlivých lineárních os svislého soustruhu, na jejichž základě je možné definovat odchylku od ideální polohy nástroje v osách X, Y a Z. Chyby mezi ideální a skutečnou polohou nástroje vzniklé translačním pohybem v osách X a Z ovlivňují výslednou rozměrovou a geometrickou přesnost obrobku. Z jaké části dochází k takovému ovlivnění, bude popsáno v následujících bodech. Chyby vzniklé od odchylek geometrie nástroje zde v práci nebudou řešeny, i když ovlivňují výslednou přesnost polohy soustavy stroj-nástroj-obrobek.

- Posunutí v osách X a Y

Vyosení nástroje od ideální polohy v hodnotách DX a DY má za následek zmenšení, popř. zvětšení od požadovaného poloměru obrobku. Ideální poloměr obrobku představuje na obrázku (Obr. 70) referenční kružnice ( $r_i$ ) a skutečný poloměr ( $r_E$ ).



Obr. 70 Chyba polohy TCP ovlivňující chybu obrobku.

Potom velikost kružnice  $r_E$  (error) je vůči referenční (ideální) kružnici  $r_i$  změněna dle:

$$r_E = \sqrt{(r_i - dX)^2 + dY^2} \quad (13).$$

Příklady změny poloměru v závislosti na odchylce nástroje v ose Y.  $DY = 0,2$  mm při ideálním poloměru obrobku 100, 500, 1200 mm, DX nyní zanedbáváme. Výsledky pro dané poloměry obrobku jsou:

$$\begin{aligned} rE(100) &= 100,0002 \text{ mm} \\ rE(500) &= 500,00004 \text{ mm} \\ rE(1\ 200) &= 1\ 200,000017 \text{ mm} \end{aligned} \quad (14).$$

Při započítání odchylky  $DX_{\max} = 0,05$  mm a  $DY = 0,2$  mm se dostáváme při stejných poloměrech na hodnoty:

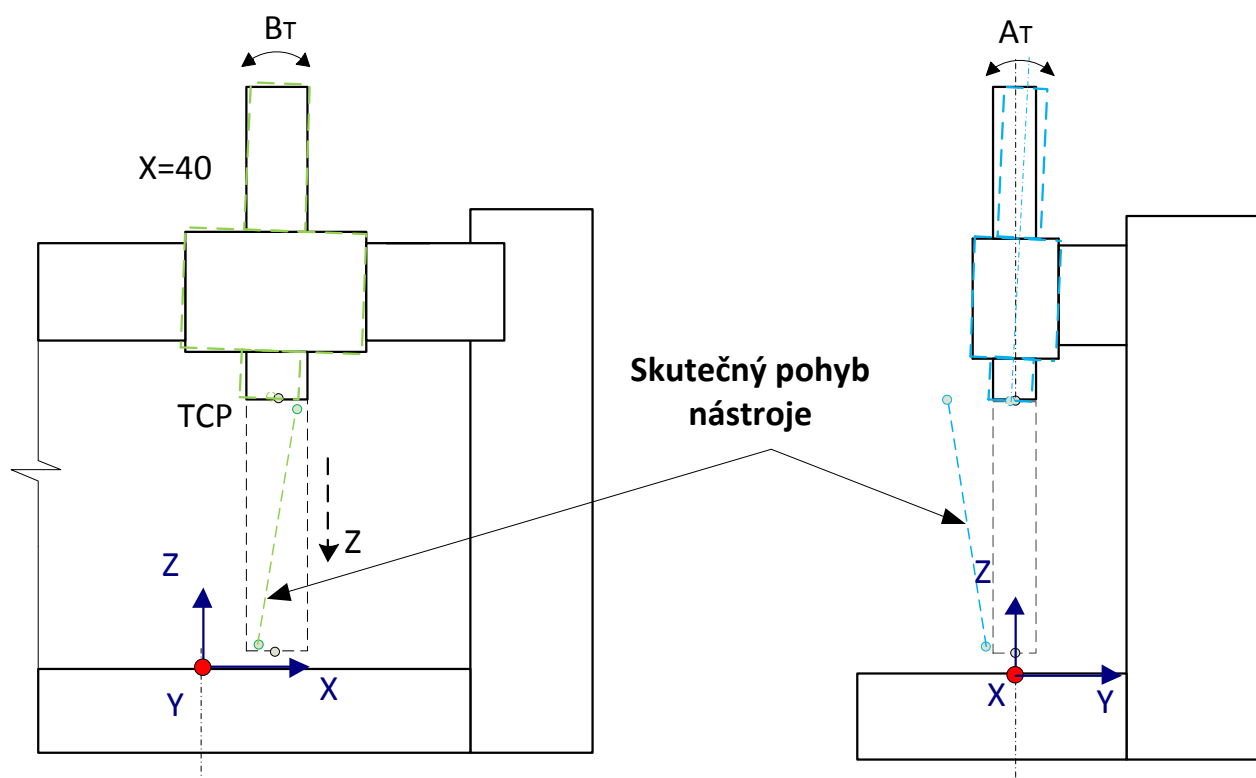
$$\begin{aligned} rE(100) &= 99,9502 \text{ mm} \\ rE(500) &= 499,95004 \text{ mm} \\ rE(1\ 200) &= 1\ 199,950017 \text{ mm} \end{aligned} \quad (15).$$

Z výsledků je možné konstatovat, že pro maximální odchylky polohy nástroje v osách X a Y ovlivňují zřetelně posunutí v ose X a chyby od posunutí v ose Y ovlivňují zanedbatelně celkovou chybu.

Dalším rozbořem měřených dat je dále patrná závislost velikosti odchylek DX, DY a DZ na polohách TCP v osách X a Z.

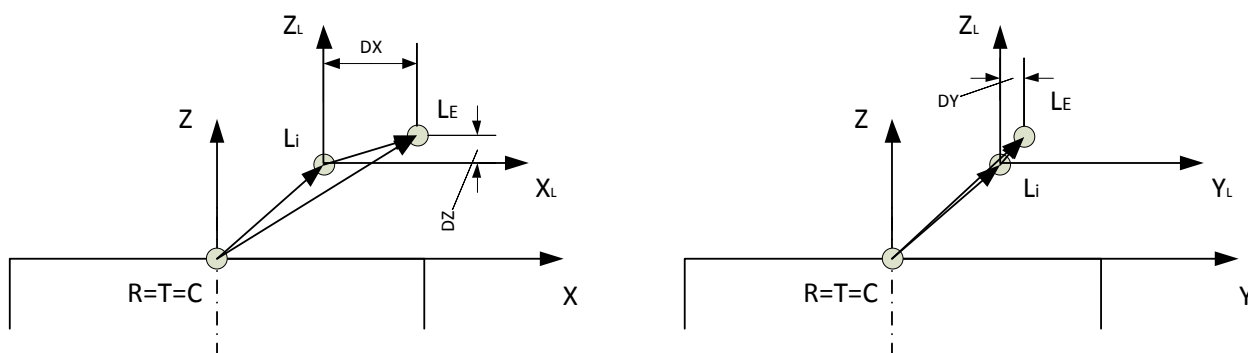
#### - Posunutí v osách XZ a YZ

Na Obr. 71 je zobrazen posuv TCP pouze v ose Z, přičemž poloha suportu a příčnicku je konstantní. Natáčení TCP okolo os X a Y je způsobeno jak změnou těžiště celého uložení, tak nepřesností uložení popř. nastavením pasivní kompenzace. Taková pasivní kompenzace je použita u vyklopení  $A_T$ , kde hodnoty jsou účelně záporné. Vyvolané síly od obrábění potom vrací TCP v důsledku poddajnosti systému do osy desky svislého soustruhu. Tím je chyba vyvolaná v této ose cíleně eliminována.



Obr. 71 Chyba TCP při výsuvu smykadla v poloze suportu  $X = 40$  mm.

Výsledkem je poloha  $L_E$  (linear error) vztažená k ideální poloze nástroje  $L_i$  (linear ideal) a současně k ideální poloze vůči souřadnému systému (C) umístěnému na ose desky svislého soustruhu. Jestliže nástroj  $L_E$  koná pouze svislý pohyb, potom maximální odchylka od osy  $DZ$  bude vyjadřovat úchylku válcovitosti (přímosti, kruhovitosti kolmých řezů).



Obr. 72 Posunutí bodu ovlivněné chybami na TCP vůči souřadnému systému rotační desky.

Získání skutečné kružnice závislé na geometrické přesnosti translačních pohybů je dána výslednými body  $L_{E\_57}$  (linear error při poloze příčniku 57) a dráhou pohybu.

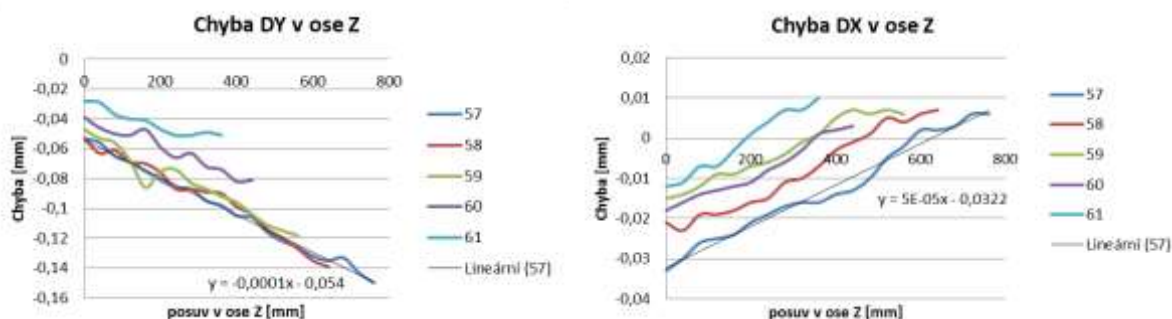
Zvolen byl svislý pohyb (pouze v ose Z) a to pro každou polohu výsuvu smykadla 0-760 mm a danou polohu suportu v ose X = 1 240 mm.

„Surová“ data získaná měřením je nutné dále zpracovat pro popis jednotlivých os, nejlépe vhodnou funkcí. Požadavky na tuto funkci jsou minimální zkreslení od skutečného průběhu odchylky, popis v celém rozsahu pracovní osy, vyjádření najetí bodu s požadovanou přesností 95% (viz. kapitola statistické zpracování). Zde jsou brány vztahy ne na pořadí, jak u statistického zpracování, ale přímo na poloze TCP. Z tohoto důvodu jsou brány rovnice popsané buď lineární funkcí, nebo polynomem 3.řádu (pro posuv v ose X).

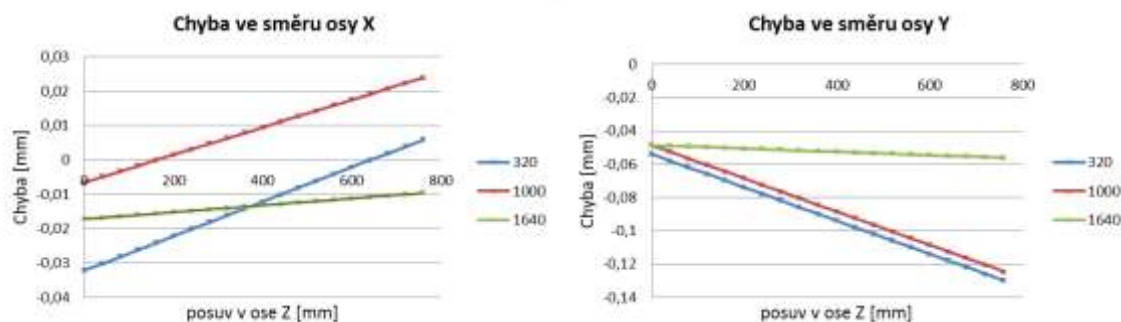
Chování odchylek DX a DY má u výsuvu smykadla lineární charakter. Na základě takového chování byla použita lineární spojnice trendu, pro všechny příklady.

**Tab. 3 Linearizace naměřených hodnot pro definovanou polohu suportu.**

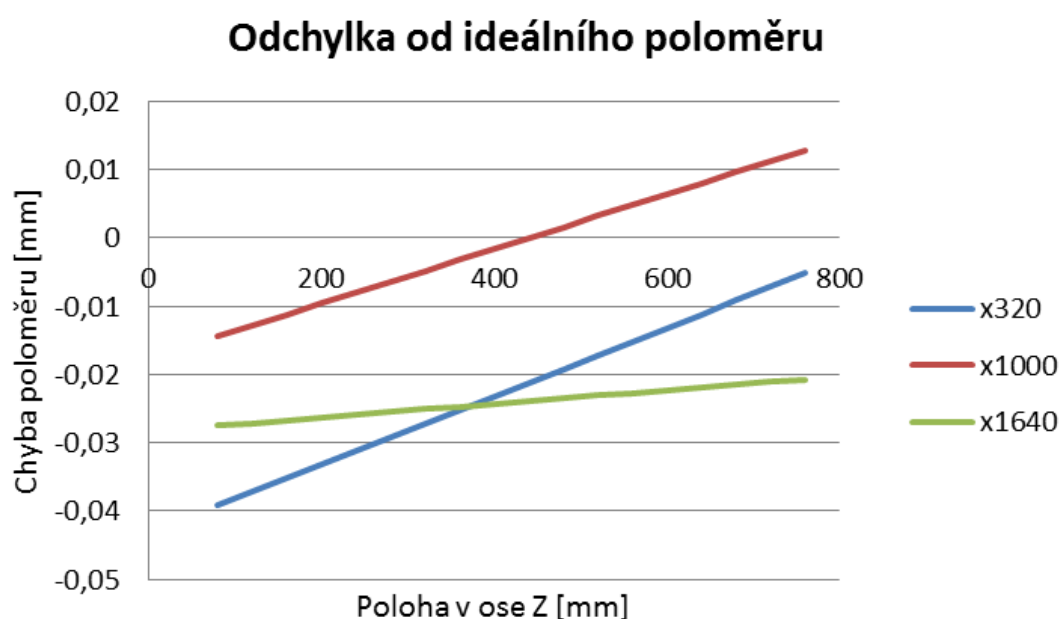
| X [mm] | 320                                  | 1 000                                | 1 640                                |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| X(z)   | $X=5 \cdot 10^{-5} \cdot z - 0.0322$ | $X=4 \cdot 10^{-5} \cdot z - 0.0066$ | $X=1 \cdot 10^{-5} \cdot z - 0.0173$ |
| Y(z)   | $Y=-0.0001 \cdot z - 0.054$          | $Y=-0.0001 \cdot z - 0.0486$         | $Y=-0.0001 \cdot z - 0.0476$         |



**Obr. 73 Chyby vzniklé při posuvu v ose Z.**



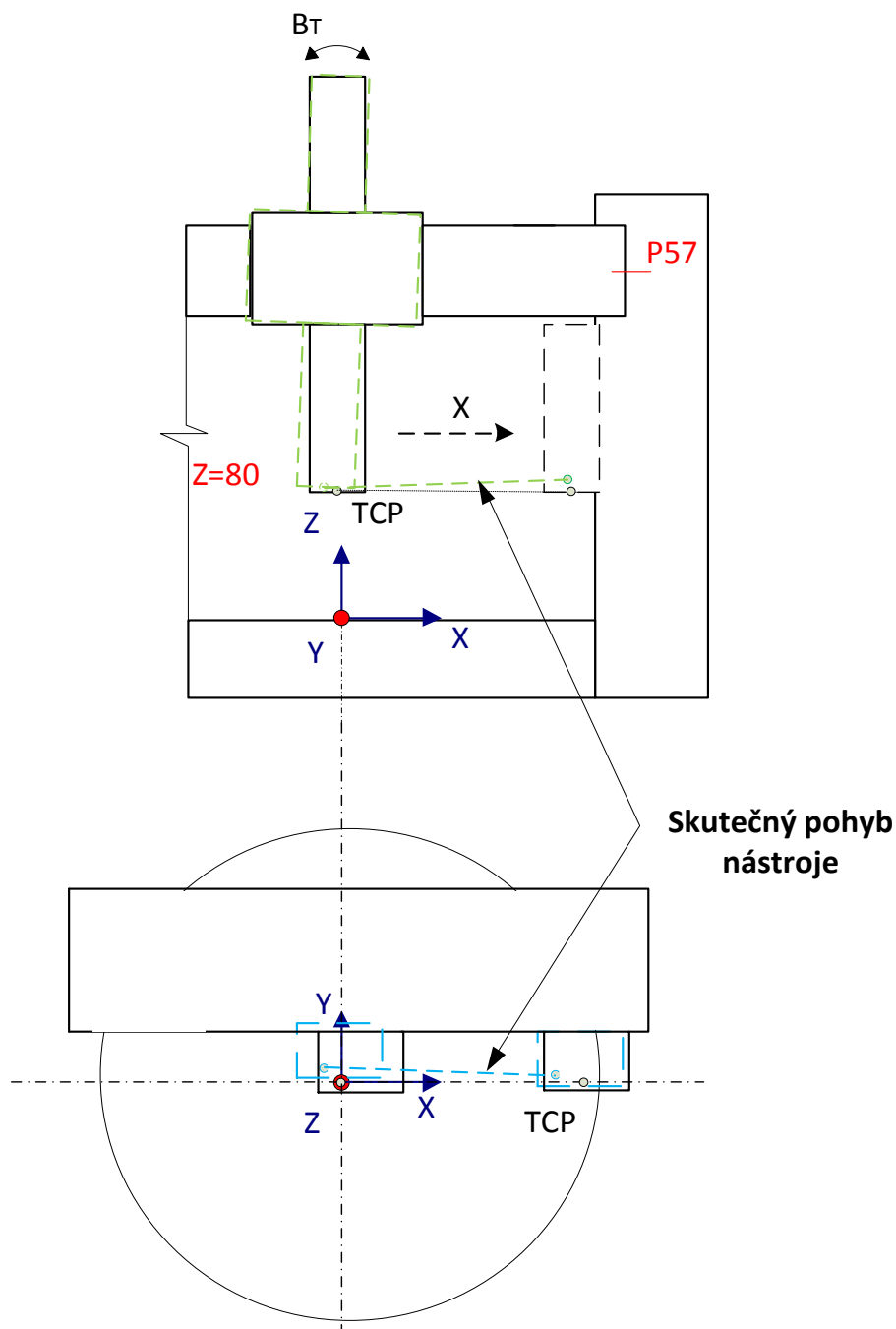
Obr. 74 Linearizované průběhy chyb při posuvu v ose Z.



Obr. 75 Závislost odchylky od ideálního poloměru na poloze Z a poloze příčnicku.

Odchylka mezi ideální polohou a naměřenou polohou TCP kopíruje graf chyby ve směru osy X.

Měření bodů za konstantní polohy smykadla, která je definována polohami  $z = 80$  mm,  $z = 360$  mm,  $z = 760$  mm.



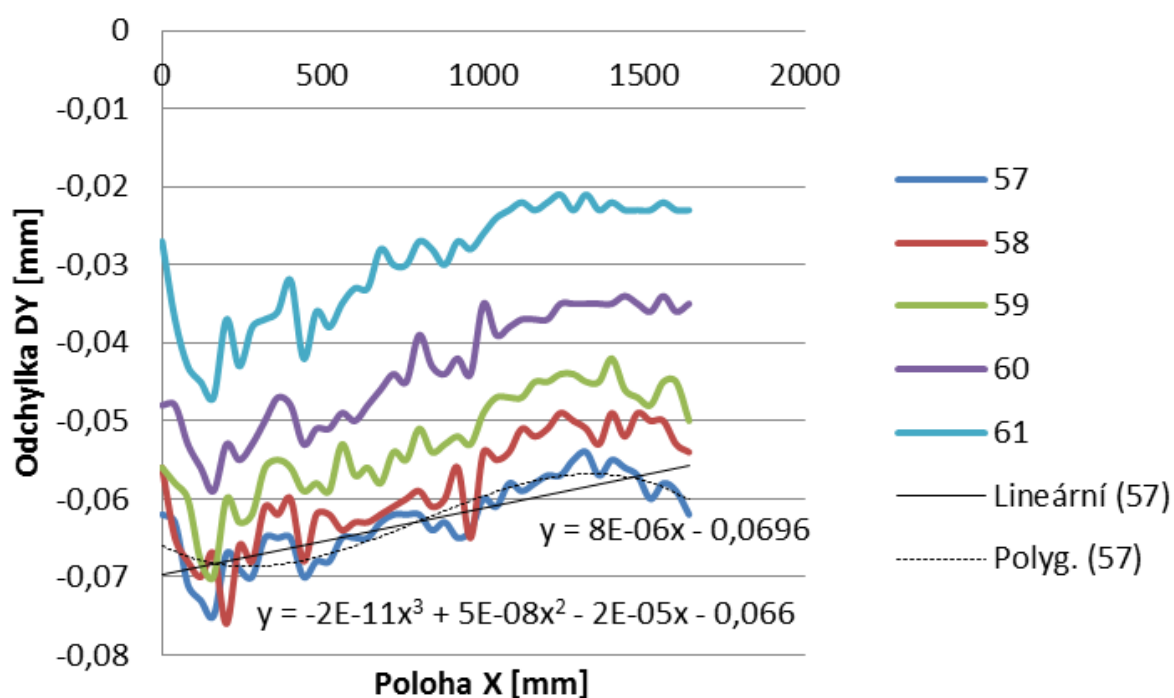
Obr. 76 Schéma identifikace chyb při posuvu v ose X.

Průběh odchylky  $DY$  v závislosti na poloze TCP  $z=80\text{mm}$  a poloze příčnicku 57 odpovídá následující graf. Pro další zpracování dat byly jednotlivé průběhy odchylek popsány dvěma funkcemi. V prvním případě lineární funkcí a v druhém případě polynomm třetího řádu (Obr. 77). Při podrobnější analýze odpovídá blíže skutečnosti náhrada funkcí polynomm. Příslušné funkce pro danou odchylku a polohu smykadla jsou uvedeny v (Tab. 4).

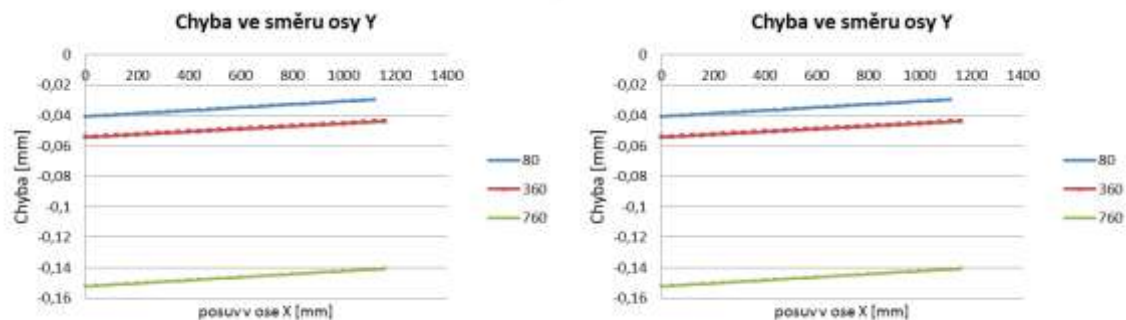


Tab. 4 Stanovení funkce pro popis pojezdu suportu při definované poloze smykadla.

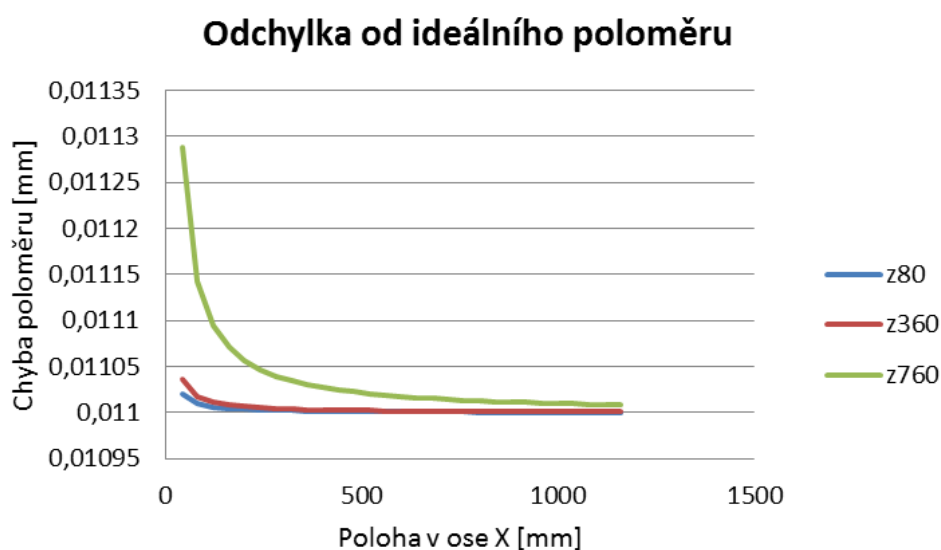
| Z<br>[mm] | 80                                                                                                             | 360                                                                                                            | 760                                                                                                            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Y(x)      | $Y = -2e-11x(i)^3 + 5e-08x(i)^2 - 2e-05x(i) - 0.0374$                                                          | $Y = -2e-11x(i)^3 + 4e-08x(i)^2 - 1e-05x(i) - 0.0996$                                                          | $Y = -2e-11x(i)^3 + 5e-08x(i)^2 - 8e-06x(i) - 0.1516$                                                          |
| Z(x)      | $Z = 0.121624551159435e-1 + 0.151899001976994e-4x(i) - 3.54203506677981e-8x(i)^2 + 1.63355727380117e-11x(i)^3$ | $Z = 0.113984361891338e-1 + 0.812345991018710e-5x(i) - 1.87712784316585e-8x(i)^2 + 9.75738576773744e-12x(i)^3$ | $Z = 0.887744555186416e-2 + 0.353375957459898e-5x(i) - 1.44118049499500e-8x(i)^2 + 1.04907821690294e-11x(i)^3$ |



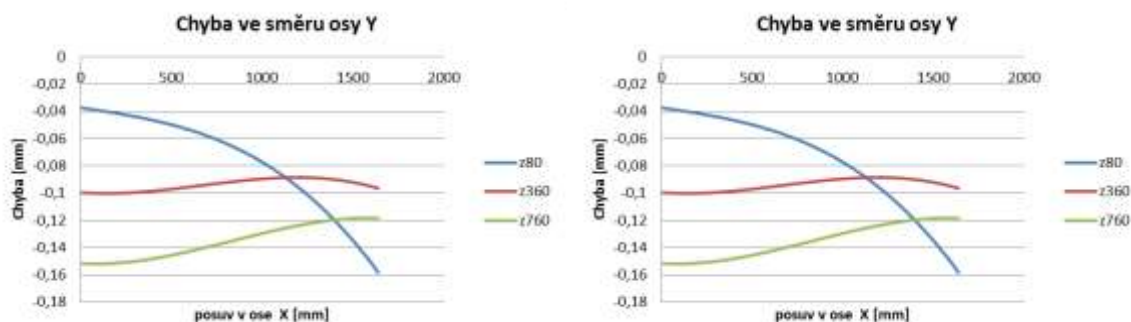
Obr. 77 Naměřené hodnoty chyby DY při posuvu TCP v ose X.



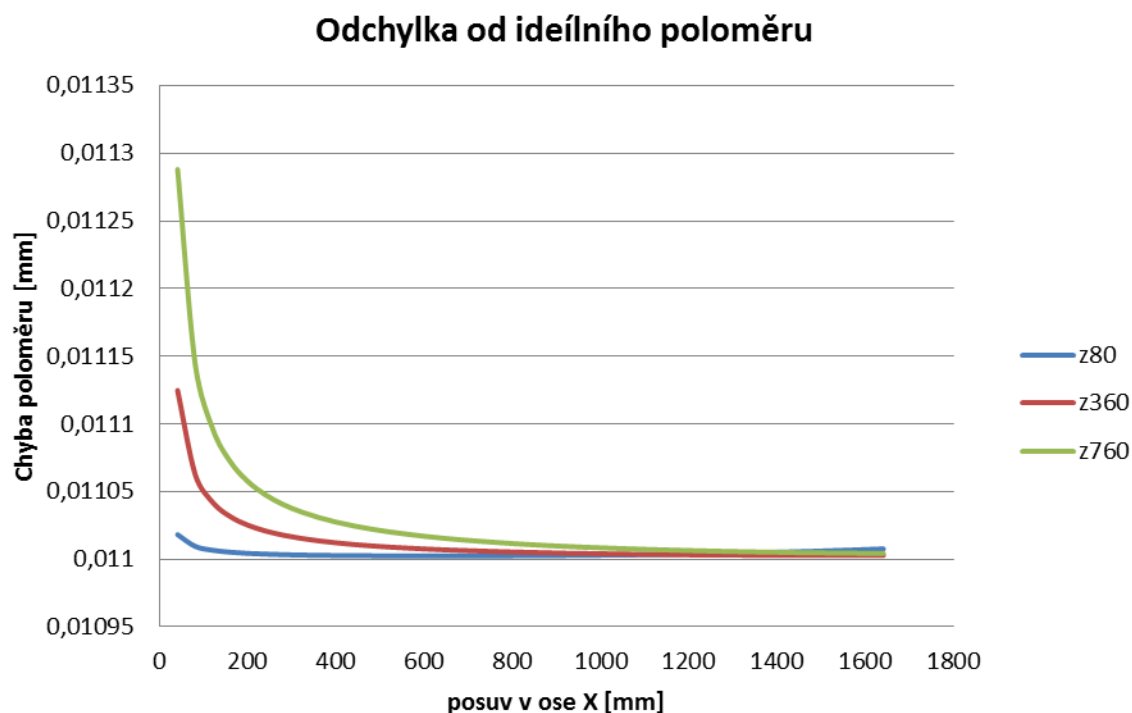
Obr. 78 Linearizované průběhy chyb při posuvu v ose X.



Obr. 79 Závislost odchylky od ideálního poloměru na poloze X a poloze příčnicku 57.



Obr. 80 Průběh chyby vzniklé při posuvu v ose X proložený polynomem.



**Obr. 81** Závislost odchylky od ideálního poloměru na poloze X a poloze příčnicku 57.

Zde tvoří největší podíl na odchylce chyba způsobená najetím do požadované polohy v ose X. Velikost hodnoty byla zvolena jako konstantní, přičemž se jedná o maximální odchylku od nuly (viz. zkoušky ISO 230-2, přesnost najetí do polohy osy X). Exponenciální průběh je dán závislostí od odchylky v ose Y, která je způsobena pasivní kompenzací výrobcem.

#### 6.4.4 Návrh měření rotační osy

S vývojem nové techniky vznikají i nové technologie pro kontrolu, diagnostiku a testování různých mechanických soustav obráběcího stroje. Jednou z hlavních funkčních částí obráběcího stroje je jeho vřeteno a sním spojené chyby (geometrické, dynamické, termické, atd.).

Kontrolu geometrické přesnosti a přesnosti nastavení polohy je možné provádět různými přístroji. Např. pomocí automatických kolimátorů, optických polygonů, příslušenstvím od firmy Renishaw XL-80 ve spojení s RX10 a zařízení AxiSet Check-Up od téže firmy, dále přístrojem MT-Check, R-test od firmy IBSPE, nebo Spindle analyzer od firmy API-senzors atd. Tyto přístroje pracují na různých systémech využívajících nejnovější technologie z oblasti senzoriky a výpočetní technologie. Poslední jmenované přístroje jsou využívány na měření a diagnostiku vřeten horizontálních soustruhů, kontrolu vřeten a stolů víceosých obráběcích

center. V žádném z těchto případů není publikováno měření a diagnostika rotačních desek velkých obráběcích strojů, mezi které nepochybně patří svislé soustruhy. Další část této kapitoly bude věnovaná právě využití nejnovějších trendů a technologií pro měření rotačních desek svislých soustruhů.

V první části je nutné stanovit veličiny, které mají být sledovány a vyhodnocovány. V další části bude řešen přístup k měření a technickému vybavení. V poslední části této kapitoly bude nastíněna problematika s veličinami, které by mohly negativně ovlivnit výsledky měření.

Pro predikci chování rotační desky svislého soustruhu z přesnosti chodu (geometrická přesnost) se nabízí sledování následujících parametrů. Tyto parametry byly vytipovány i na základě prováděných měření ve firmě TOSHULIN na každém, z nových strojů dle ČSN ISO 3655. Jsou to především interně definované maximální hodnoty pro čelní házení, obvodové házení atd.

Z hlediska chování obrobku vůči pevnému nástroji můžeme uvažovat, že parametry ovlivňující tyto vlastnosti budou házení desky ve směrech X, Y a Z. Potom je možné předpokládat chyby v naklonění osy okolo os X a Y. Chyba vzniklá při rotaci okolo osy Z nehraje při soustružení žádnou roli. Při aplikaci C-osy je sledována chyba přesnosti najetí do požadované polohy (úhlová chyba) definovaná dle ČSN ISO 230. Dalším parametrem ovlivňujícím negativně výslednou přesnost je posunutí středu rotační desky svislého soustruhu o hodnoty  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  vlivem tuhosti soustavy a teplotního zatížení (Obr. 82). Bude tedy možné sledovat chyby, které se projevují na jedné otáčce a dále chyby projevující se v delším časovém úseku. Záležet bude především na volbě testu a vybraných veličin.

### ***Definování hledaných chyb rotační desky svislého soustruhu***

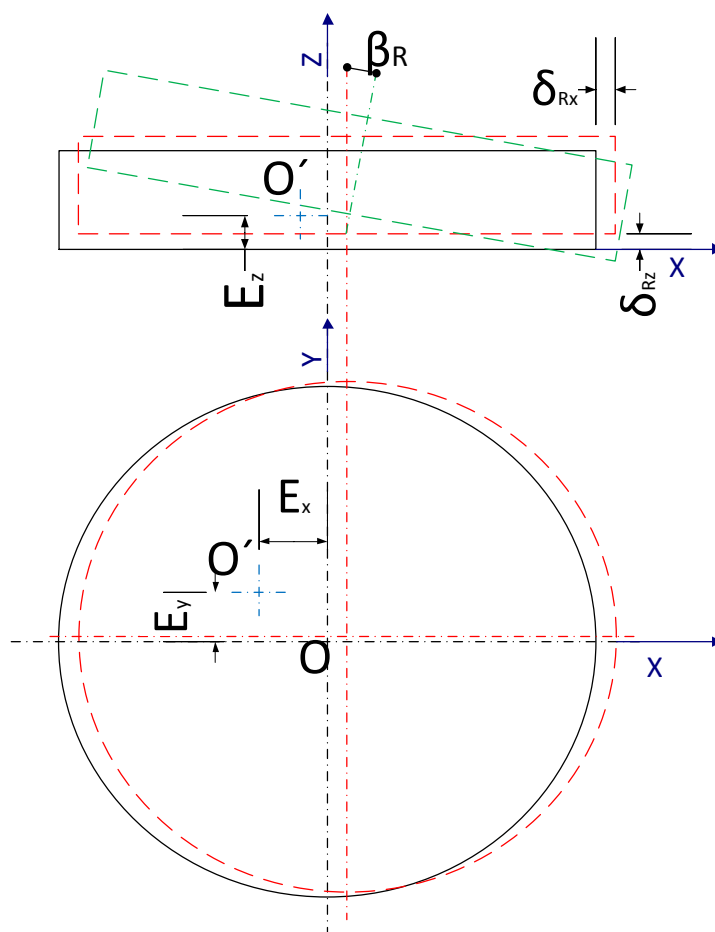
Vybrané veličiny jsou popsány v následující tabulce, včetně jejich značení.

**Tab. 5 Sledované chyby rotační desky svislých soustruhů.**

|                        |                                                                  |
|------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $\delta_{Rx}(\varphi)$ | Posunutí v ose X, závislé na poloze natočení desky ( $\varphi$ ) |
| $\delta_{Ry}(\varphi)$ | Posunutí v ose Y, závislé na poloze natočení desky ( $\varphi$ ) |
| $\delta_{Rz}(\varphi)$ | Posunutí v ose Z, závislé na poloze natočení desky ( $\varphi$ ) |
| $\alpha_R$             | Naklonění desky okolo osy X                                      |
| $\beta_R$              | Naklonění desky okolo osy Y                                      |
| $E_{Rx}$               | Posunutí středu otáčení rotační desky v ose X                    |

|          |                                               |
|----------|-----------------------------------------------|
| $E_{Ry}$ | Posunutí středu otáčení rotační desky v ose Y |
| $E_{Rz}$ | Posunutí středu otáčení rotační desky v ose Z |

Na následujícím zjednodušeném schématu rotační desky svislého soustruhu (Obr. 82) jsou zobrazeny a popsány výše uvedené chyby v rovině XY a XZ, analogicky potom platí chyby v rovině YZ. Odvození velikostí vybraných chyb rotační desky je již závislé na principu měření. Jednotlivé koncepce měření jsou blíže popsány v následující kapitole. K vybrané variantě měření rotační desky bude provedena analýza stanovení velikostí jednotlivých chyb.



Obr. 82 Chyby vyskytující se na rotační desce.

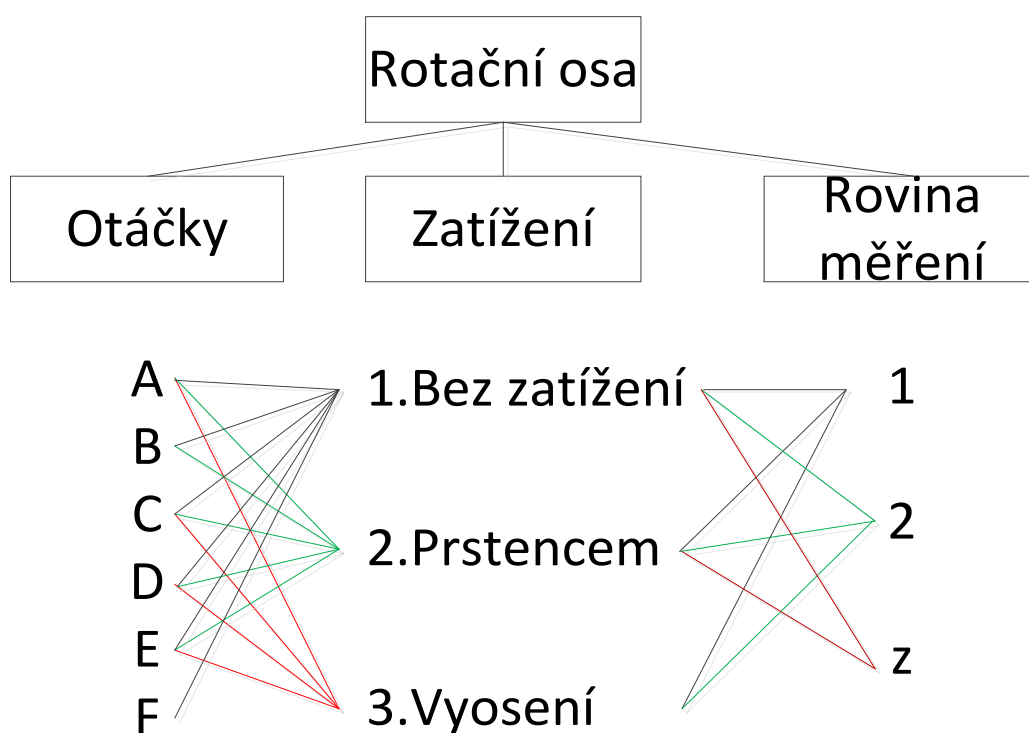
### ***Návrh měření rotační desky svislého soustruhu a volba měřícího vybavení***

Návrh měření vychází především z požadavků definovaných v (Tab. 5). Aby bylo možné získat všechny hledané parametry rotační desky, je zapotřebí sledovat

minimálně pět bodů na rotační desce svislého soustruhu. Autor Weck ve své publikaci [42] naznačil možnosti na horizontálním soustruhu, kde pro měření pěti odchylek vřetene soustruhu a jejich úplné vyhodnocení využil pěti sledovaných míst.

Aby bylo možné predikovat vlastnosti obrobku dle požadavků zákazníka, který dodanou výkresovou dokumentací definuje své požadavky, je nezbytné zahrnout do požadavků na měření co nejvíce proměnných parametrů vycházejících ze zkušeností zaměstnanců firmy TOSHULIN, a.s. Mezi tyto ovlivňující prvky se mohou počítat např. hrubovací a dokončovací operace. Jak již bylo specifikováno dříve, je v této práci bráno v potaz pouze dokončování, tedy zanedbatelné ovlivnění výsledků silami od obrábění. Dalšími prvky ovlivňující přesnost chodu stroje jsou hmotnost obrobku a počet otáček desky stolu. Na následujícím obrázku (Obr. 83) je schematicky znázorněn možný princip plánovaného měření. Na desce soustruhu mohou být uloženy obrobky (o1-o3) o hmotnostech (m1-m3), a dále mohou být nastaveny otáčky desky ( $0-n_{\max}$ ), dle možného rozsahu konkrétního svislého soustruhu.

Příprava a průběh měření rotační desky stroje proběhla ve spolupráci s Ing. Synkem (TOSHULIN, a.s.). V průběhu měření na stroji SKIQ30, v.č. 1604 byla provedena měření pro odlišné otáčky a zatížení rotační desky. Zatěžujícím podmínkám byla přiřazena příslušná označení dle následujícího schématu.



Obr. 83 Schéma postupu měření rotační desky.

Označení otáček odpovídá zvolené řadě:

- $A = 5 \text{ ot/min}$
- $B = 40 \text{ ot/min}$
- $C = 90 \text{ ot/min}$
- $D = 130 \text{ ot/min}$
- $E = 170 \text{ ot/min}$
- $F = 200 \text{ ot/min}$

Zatížení rotační desky bylo zvoleno následovně:

- Bez zatížení (na desce upnut pouze trn)
- Prstenec (na desce upnut prstenec dle Obr. 84 o hmotnosti 2 100 kg)
- Vyosení (prstenec byl vyosen se zatížením 20 kg)



Obr. 84 Měření svislého soustruhu s upnutým prstencem.

Rovina měření odpovídá třem místům na zkušebním trnu (1, 2 a z). Označení 1 a 2 jsou přiřazena radiálním snímačům v osách X a Y. Snímače položené blíže

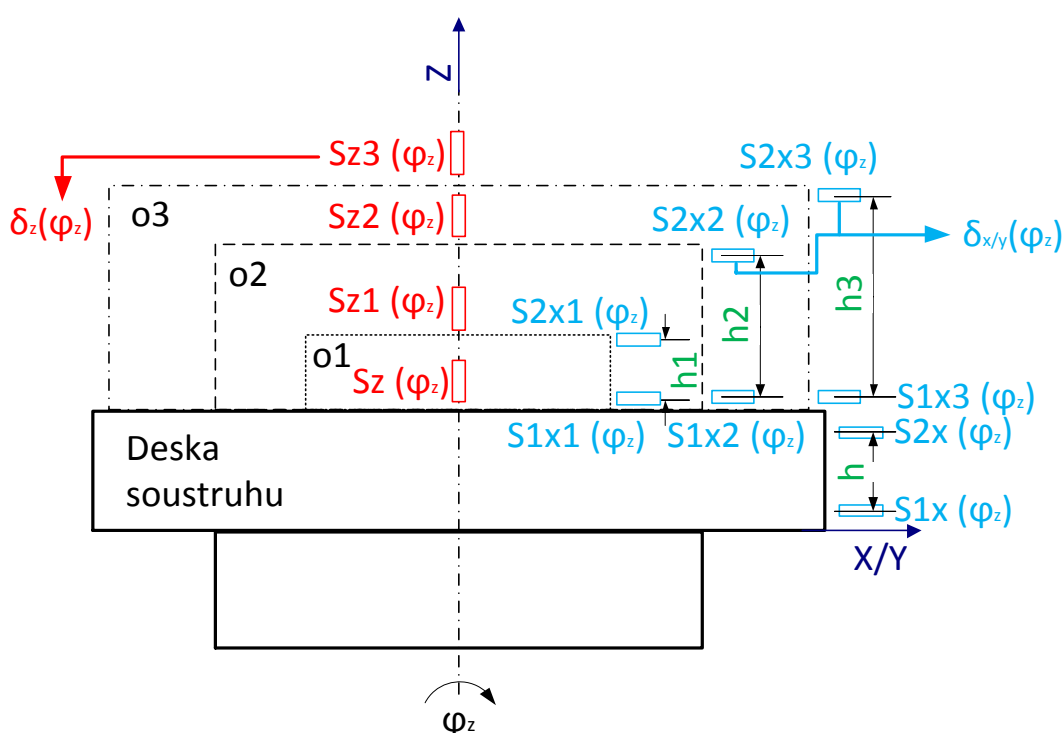
k desce mají označení roviny 1 a snímače vzdálené od roviny 1 délkou  $h$  mají označení roviny 2. Axiální složku potom zaznamenává snímač s označením  $z$ .

Výsledné značení pro všechna měření odpovídá dle:

**„ijk“**,

kde **i** odpovídá zatížení rotační desky, **j** vyjadřuje otáčky měření a **k** rovinu měření na zkušebním trnu. Datovému souboru z měření rotační desky zatíženou prstencem při otáčkách 40ot/min a měřenou v rovině 1 odpovídá zápis ve tvaru:

**„2B1“**



Obr. 85 Princip rozmístění snímačů na rotační desce.

Získání potřebných informací o „chování desky“ (viz. předchozí kapitola) vychází ze schématu (Obr. 85), kde hledané chyby lze získat z následujících vztahů:

- Odchylka vzniklá na snímači  $S_z$ :

$$S_z(\varphi_z) = \delta_{Rz}(\varphi_z) \quad (16).$$

- Odchylka vzniklá na snímačích  $S1x$  a  $S2x$



$$(S2_x(\varphi_z) - S1_x(\varphi_z)) = \delta_{Rx}(\varphi_z) \quad (17).$$

$$\operatorname{atan}\left(\frac{S2_x(\varphi_z) - S1_x(\varphi_z)}{h}\right) = \delta_{\beta R}(\varphi_z) \quad (18).$$

- Odchylka vzniklá na snímačích S1y a S2y

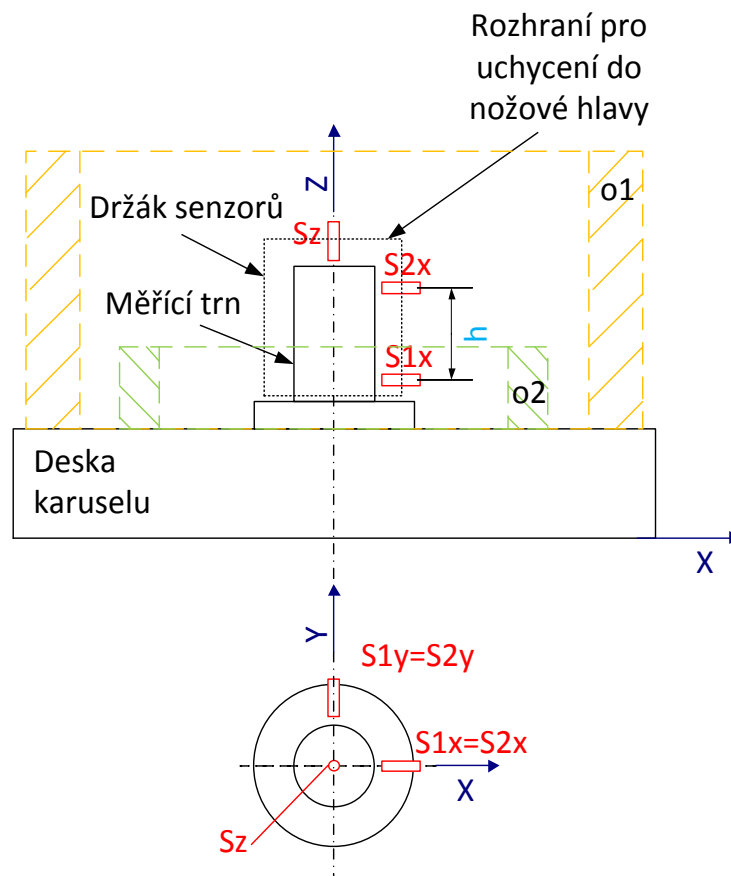
$$(S2_y(\varphi_z) - S1_y(\varphi_z)) = \delta_{Ry}(\varphi_z) \quad (19).$$

$$\operatorname{atan}\left(\frac{S2_y(\varphi_z) - S1_y(\varphi_z)}{h}\right) = \delta_{\alpha R}(\varphi_z) \quad (20).$$

Tímto krokem bylo získáno 5 odchylek ( $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$ ,  $\delta_{\varphi x}$ ,  $\delta_{\varphi y}$ ), poslední neznámou veličinou je  $\delta_{\varphi z}$ . Ta je měřena např. vybavením fy. RENISHAW a je označována, jako chyba najetí do požadované polohy (stroj musí mít opci C-osy).

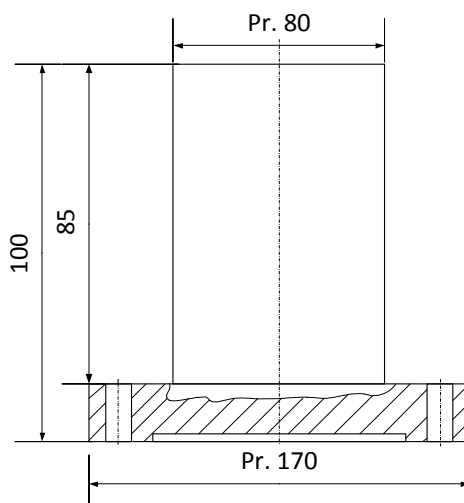
Z hlediska možností využití na reálném stroji je tento model nepoužitelný a to z několika důvodů. Všechny typy plánovaných zkušebních obrobků (o1-o3) by musely mít dostatečně přesný povrch pro kvalitní zpracování naměřených hodnot ze senzorů, a to jak po obvodě, tak i na jejich čele. Dále u zkoušky bez obrobku není vůbec možné měřit požadované chyby přímo na desce stroje – opět se zde vyskytuje problém s nedostatečně přesným a kontinuálně hladkým povrchem. Výše uvedené kritéria na měření neumožňují výše naznačený proces realizovat.

Z další podrobné analýzy byl vybrán model s měřicím trnem, který je blíže popsán v následujících odstavcích. Princip měření a vyhodnocení chyb na rotační desce svislého soustruhu byl modifikován dle následujícího schématu (Obr. 86):



Obr. 86 Modifikovaný způsob pro měření rotační desky.

U druhé varianty je použit měřicí trn, který lze jednoduše vystředit k desce svislého soustruhu a má předepsané geometrické tolerance dle výkresové dokumentace TOSHULIN č.v. 103900002D90 [29]. Zkušební trn je běžně využíván pro měření svislých soustruhů dle ČSN ISO 3655. Po ustavení na desce svislého soustruhu je na měřicí trn zasunut držák senzorů, který je upevněn v nožové hlavě smykadla (viz. Obr. 86). Při návrhu měřicí jednotky se vyskytl první parametr, který omezil rozměry budoucího zkušebního obrobku. Jedná se o rozměr držáku senzorů a připojovací rozměr ke smykadlu. Obrobek musí být volen tak, aby umožnil svislý pohyb smykadla a případné dodatečné ustavení měřicí jednotky. Tvar obrobku odpovídá prstenci o různých průměrech a výškách, při zachování jednoho měřicího trnu. U nejmenších svislých soustruhů z produkce TOSHULIN se tedy jedná o velké omezení, naopak u větších řad toto omezení částečně odpadá se zvyšujícím se pracovním prostorem na rotační desce. Svými rozměry je možné zkušební trn (Obr. 87) upnout na všechny stroje firmy TOSHULIN a je tedy univerzální. Funkční část pro měření na zkušebním trnu má rozměry: průměr 80mm a výška 85mm.



Obr. 87 Měřicí trn svislého soustruhu.

Volba senzorů vycházela z několika následujících bodů:

- Vzhledem k principu použití a požadované přesnosti měření byl zvolen princip bezkontaktního snímání vzdálenosti. Mechanické (kontaktní) snímače by byly omezeny funkčními mechanickými částmi a podléhaly by opotřebení.
- Rozsah otáček svislého soustruhu se pohybuje od 0 – 800 ot/min (závisí na velikosti stroje a zatížením rotační desky)
- Materiál a rozměry zkušebního trnu
- Rozlišení, citlivost snímačů
- Kalibrace snímačů
- Dostupnost, pracovní prostředí, výstupní signál

Na základě těchto požadavků byla provedena rešerše v oblasti bezkontaktních snímačů. Mezi zástupci byli vybráni následující výrobci: Micro Epsilon, Schenk, Balluff, Baumer, Bruel and Kjaer. Po poptání u jednotlivých firem se naskytla příležitost k zapůjčení snímačů od firem Micro Epsilon a Bruel and Kjaer (Schenk). Bližší vlastnosti snímačů jsou zobrazeny v následující tabulce. Informace o jednotlivých typech snímačů byly získány ze stránek výrobců [44, 45].

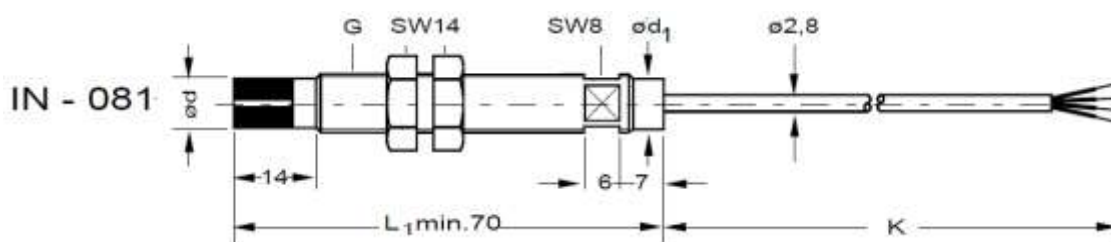
Na základě dalších konzultací ve firmě TOSHULIN a možnostech měřit na svislém soustruhu, byla zvolena strategie zapůjčení snímačů na delší dobu, kvůli obtížně plánované odstávce stroje v TOSHULIN pro zkušební měření. Těmto požadavkům vyhověl majitel snímače B&K IN\_081. Z těchto důvodů byl dále využíván již zmiňovaný snímač. Dle datasheetu [44] je nutné pro správné měření

Vliv geometrické přesnosti vybraných obráběcích center na požadované vlastnosti výrobků

dodržet předepsaný postup, který je dále blíže popsán. Tento postup se týká především upevnění snímačů a kalibrace.

Tab. 6 Dostupné bezkontaktní snímače.

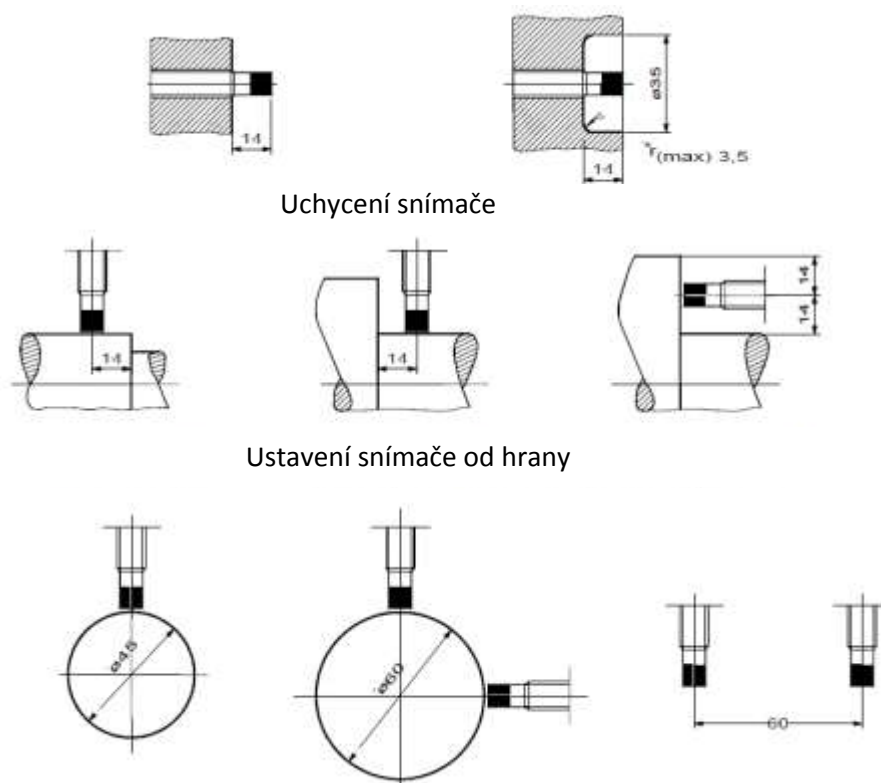
|                       | Micro Epsilon<br>eddyNCDT3010                | Micro Epsilon<br>CS08        | Micro Epsilon,<br>CS1        | B&K<br>IN_081            |
|-----------------------|----------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Měřicí rozsah<br>(mm) | 1                                            | 0,8                          | 1                            | 1,5                      |
| Linearita %           | $<\pm 0,25\text{FSO}$                        | $<\pm 0,05\text{FSO}$        | $<\pm 0,05\text{FSO}$        | Dle přílohy              |
| Rozlišení             | $0,05\mu\text{m}$<br>( $0,005\%\text{FSO}$ ) | 16nm                         | 20nm                         | $8\text{mV}/\mu\text{m}$ |
| Teplotní<br>stabilita | $<\pm 0,025\text{FSO}$                       | $60\text{nm}/^\circ\text{C}$ | $60\text{nm}/^\circ\text{C}$ |                          |



Obr. 88 Schéma bezkontaktního snímače IN-081 [44].

- Frekvence  $0 \dots 10\text{kHz}$
- Rozlišení  $8\text{mV}/\mu\text{m}$
- Rozsah  $1,5\text{mm}$
- Chyba rozlišení  $< \pm 5\%$
- Odchylka od referenční hodnoty  $< \pm 2\%$

Jak bylo již řečeno jedno z omezení snímače IN\_081 je dáno dle [44], na min. průměru trnu, vzdálenosti snímače od hrany, od druhého snímače atd. Více je zobrazeno na Obr. 89.

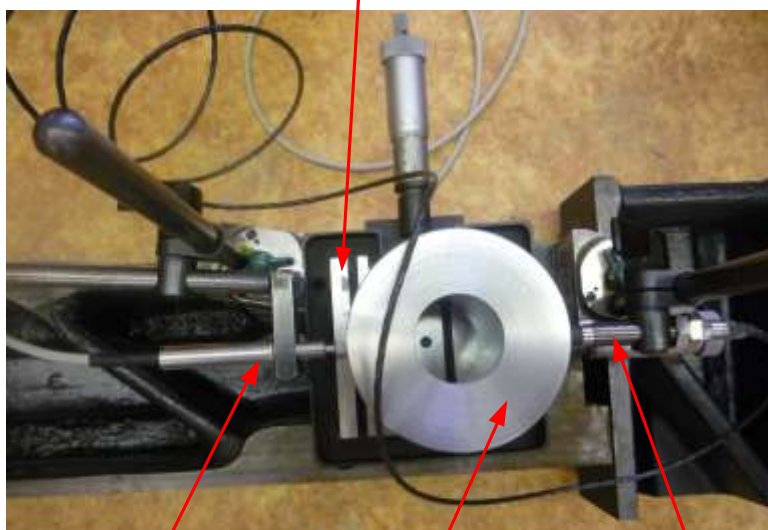


Požadavky na průměr trnu a vzdáleností od snímačů

**Obr. 89 Požadavky pro nasazení bezkontaktního snímače IN-081 [44].**

Citlivost snímače  $8\text{mV}/\mu\text{m}$  je definována pro materiál 42CrMo4, pro jiné materiály musí být provedena kalibrace. V [44] je definována citlivost pro celou škálu materiálů. V příloze nebyl nalezen materiál měřícího trnu, proto bylo nutné před samotným měřením provést kalibraci snímače na materiál měřícího trnu. Kalibrace byla provedena pomocí kontaktního snímače a stolu s mikrometrickým posuvem dle následujícího obrázku (Obr. 90).

## Stůl s mikrometrovým posuvem



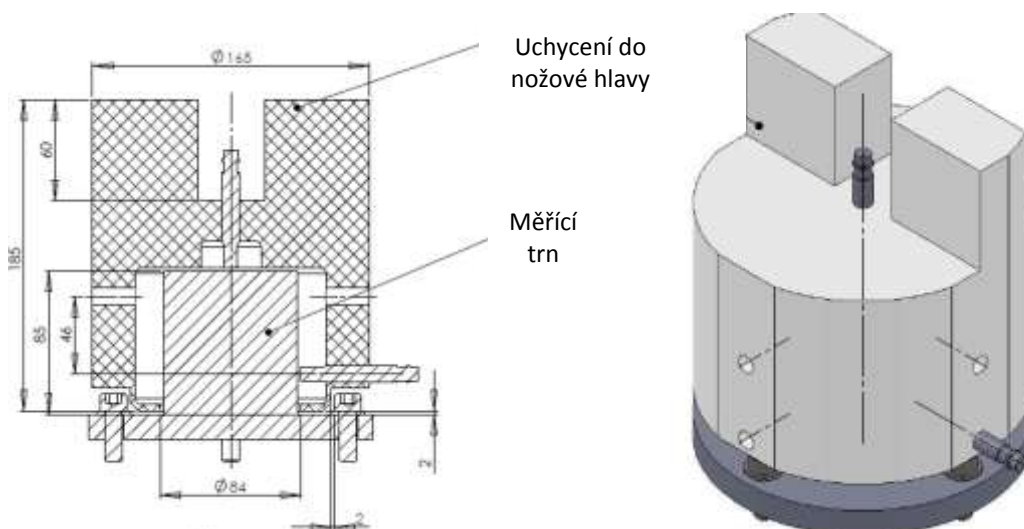
Kontaktní snímač  
MicroEpsilon  
DTA-1G-1,5-CA

Materiál trnu

Bezkontaktní  
snímač IN\_081

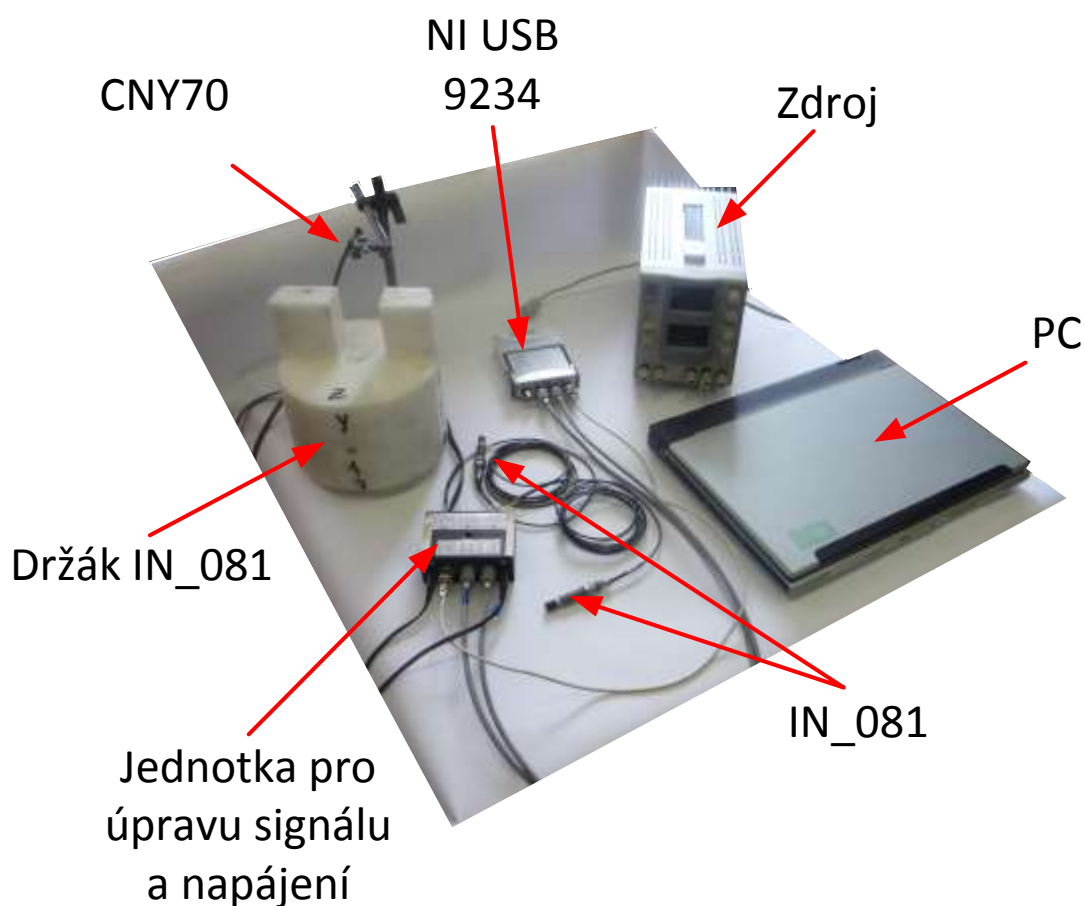
**Obr. 90 Kalibrace bezkontaktního snímače.**

Kalibrací byl proveden první krok – definování citlivosti pro materiál měřícího trnu. V dalším kroku bylo navrženo rozhraní mezi snímači a nožovou hlavou smykadla–držák IN\_081 (příloha 16.7), který vycházel z výkresové dokumentace nástrojového držáku testovaného stroje.



**Obr. 91 Princip uchycení snímačů v držáku IN-081.**

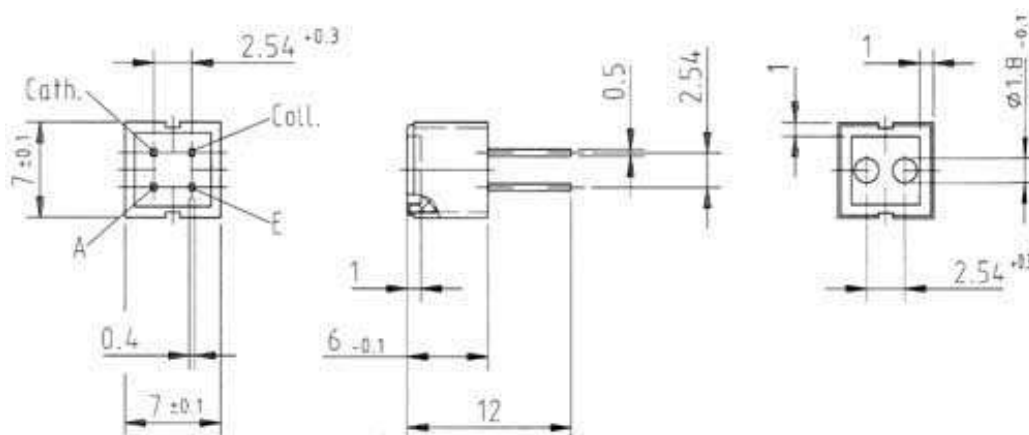
Kompletní měřicí jednotka je zobrazena Obr. 92 a je sestavena z následujících komponent. Tato jednotka včetně software byla sestavena ve spolupráci s Ing. Janem Pavlíkem, Ph.D. a s Ing. Miroslavem Oplem. Sestava měřicí jednotky se skládá ze zdroje, notebooku, dvou snímačů IN\_081, jednotky pro úpravu signálu a napájení (navržená a vyrobena na UVSSR), držáku IN\_081, optického snímače CNY70 a karty NI USB 9234.



**Obr. 92 Navržená jednotka pro měření rotační desky svislých soustruhů.**

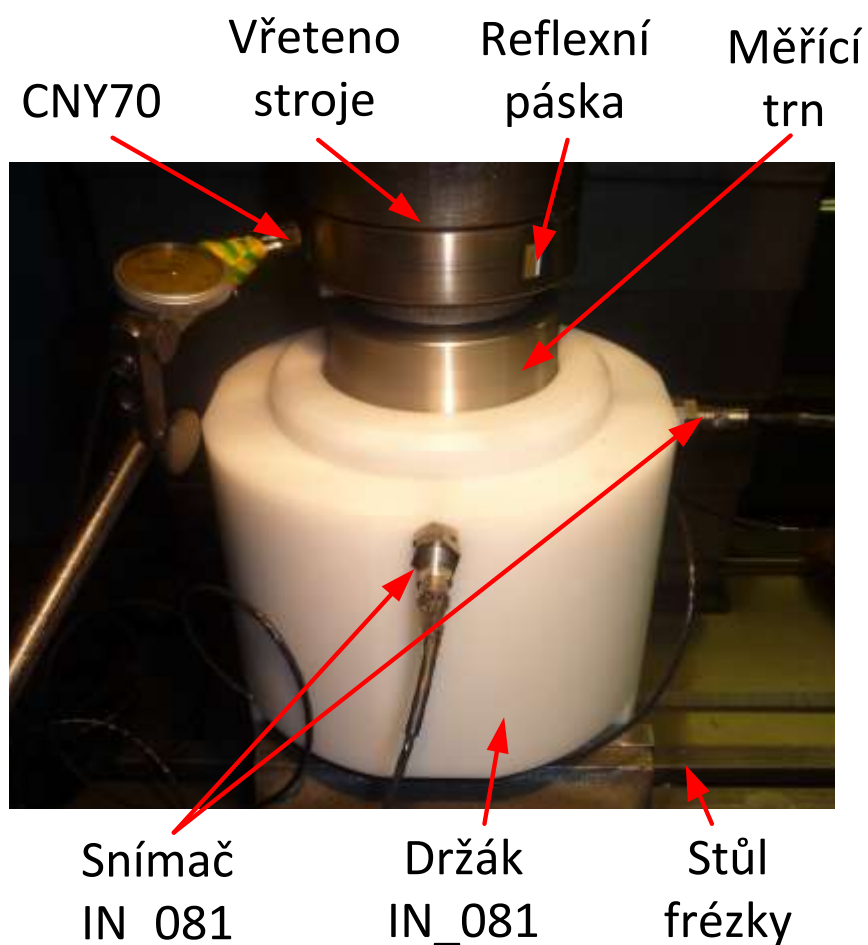
Jednotka pro úpravu signálu a napájení zde slouží pro úpravu signálu dle požadavků výrobce mezi zdrojem a snímačem, a dále mezi kartou NI a snímačem. Výstupem jsou již zpracované signály, které lze následně zaslat do PC. Taktéž slouží pro napájení a přenos signálu z optického snímače CNY70 do karty NI. Optický snímač CNY70 slouží pro definování polohy na rotační desce svislého soustruhu. Jedná se o alternativní řešení na místo připojení do řídicího systému stroje, které bylo z časových a finančních důvodů nereálné. Aby byla dostatečně přesně zajištěna vazba poloha desky-výchylka na snímačích, byl nasazen optický snímač CNY70 (viz. Obr. 93).





Obr. 93 Schéma optického snímače CNY70 [46].

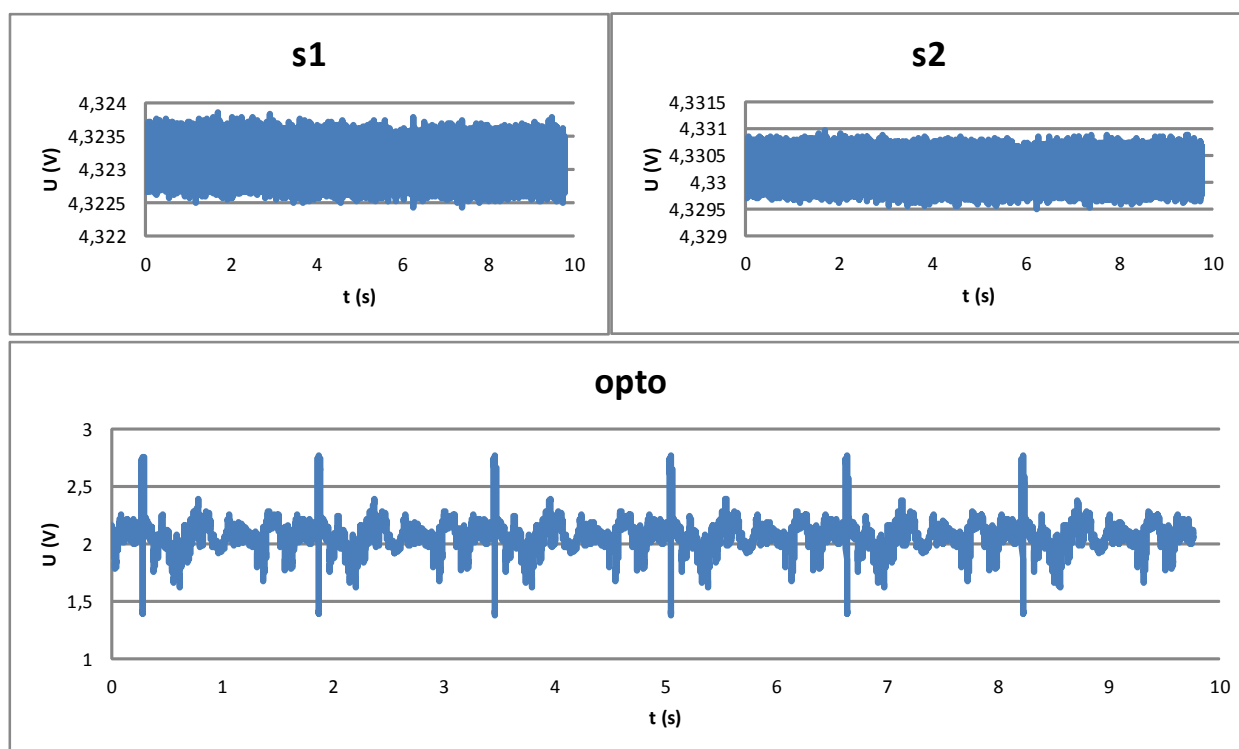
Zkoušky celé jednotky probíhaly v dílnách UVSSR FSI VUT v Brně na frézovacím stroji FNG 32 (Obr. 94). Měřicí trn byl uchycen do vřetene stroje a držák IN\_081 byl upnut na stůl frézky.



Obr. 94 Aplikace měřicí jednotky na vertikální frézce FNG32.



Výstupy pro snímač 1 (s1), snímač 2 (s2) a optického snímače (dále pouze opto) jsou zobrazeny v následujících grafech (Obr. 95). Ve všech případech je výstupní veličinou napětí, přičemž pro snímače s1 a s2 se musí napětí dále přepočítat podle kalibrované citlivosti na výstupní hodnotu v  $\mu\text{m}$ . Velikost napětí z opto je závislý na vzdálenosti mezi reflexní páskou a samotným vysílačem. V tomto případě jsou dosahované špičky okolo 2,7 V a hodnoty šumu jdou maximálně k 2,4 V. Pro tento konkrétní případ bylo vhodné zvolit jako referenční hodnotu pro definování otáčky 2,6 V. Přitom opakovatelnost je při minimálních 40 ot/min a maximálních 200 ot/min otáčkách popsána v následujícím odstavci. Nastavení karty NI USB 9234 bylo nastaveno na maximální vzorkování 50,2 kS/s na kanál a doba snímání byla nastavena pro všechna měření 10s. Doba měření byla zvolena na základě požadavku minimálně 5 otáček, což odpovídá pro minimální otáčky frézky 40 ot/min (viz. Obr. 95). Tomu potom odpovídá vzorkování jedné otáčky cca. 8 100 sample/otáčka. Pro maximální měřené otáčky frézky 200 ot/min bylo zaznamenáno okolo 30 otáček, kterému odpovídá vzorkování jedné otáčky okolo 1 590 sample/otáčka.



Obr. 95 Výstupní signály pro S1, S2, opto z měření.

### 1. Běh:

#### a. 40 ot/min

$$\bullet 1 \text{ ot} - (9\,564 - 1\,430) = 8\,134, \quad 360^\circ / 8\,134 = 0,04426^\circ$$

- $2\text{ot} - (17\,696 - 9\,564) = 8\,132, 360^\circ / 8\,132 = 0,04427^\circ$
- $3\text{ot} - (25\,830 - 17\,696) = 8\,134, 360^\circ / 8\,134 = 0,04426^\circ$
- $4\text{ot} - (33\,960 - 25\,830) = 8\,130, 360^\circ / 8\,130 = 0,04428^\circ$
- $5\text{ot} - (42\,096 - 33\,960) = 8\,136, 360^\circ / 8\,136 = 0,04425^\circ$

## b. 200 ot/min

- $1\text{ot} - (2\,962 - 1\,373) = 1\,589, 360^\circ / 1\,589 = 0,2266^\circ$
- $2\text{ot} - (4\,553 - 2\,962) = 1\,591, 360^\circ / 1\,591 = 0,2263^\circ$
- $3\text{ot} - (6\,144 - 4\,553) = 1\,591, 360^\circ / 1\,591 = 0,2263^\circ$
- $4\text{ot} - (7\,733 - 6\,144) = 1\,589, 360^\circ / 1\,589 = 0,2266^\circ$
- $5\text{ot} - (9\,323 - 7\,733) = 1\,590, 360^\circ / 1\,590 = 0,2264^\circ$

## 2. Běh

U druhého pokusu byl optočlen dán blíže k reflexnímu bodu, přičemž špičky napětí dosahovaly 3,9 V a šum se pohyboval v hodnotách max. 3,5 V. Volila se zde hranice pro stanovení otáčky 3,8 V.

## a. 40 ot/min

- $1\text{ot} - (15\,706 - 7\,667) = 8\,039, 360^\circ / 8\,039 = 0,0448^\circ$
- $2\text{ot} - (23\,770 - 15\,706) = 8\,064, 360^\circ / 8\,064 = 0,0464^\circ$
- $3\text{ot} - (31\,810 - 23\,770) = 8\,040, 360^\circ / 8\,040 = 0,0448^\circ$
- $4\text{ot} - (39\,860 - 31\,810) = 8\,050, 360^\circ / 8\,050 = 0,0447^\circ$
- $5\text{ot} - (47\,907 - 39\,860) = 8\,047, 360^\circ / 8\,047 = 0,0447^\circ$

## b. 200 ot/min

- $1\text{ot} - (1\,615 - 25) = 1\,590, 360^\circ / 1\,590 = 0,2264^\circ$
- $2\text{ot} - (3\,205 - 1\,615) = 1\,590, 360^\circ / 1\,590 = 0,2264^\circ$
- $3\text{ot} - (4\,795 - 3\,205) = 1\,590, 360^\circ / 1\,590 = 0,2264^\circ$
- $4\text{ot} - (6\,385 - 4\,795) = 1\,590, 360^\circ / 1\,590 = 0,2264^\circ$
- $5\text{ot} - (7\,975 - 6\,385) = 1\,590, 360^\circ / 1\,590 = 0,2263^\circ$

Přesnost indexování je závislá na velikosti otáček rotační desky v hodnotách  $0^{\circ}2'41''$  pro 40 ot/min a  $0^{\circ}13'35''$  pro 200 ot/min. Tyto hodnoty odpovídají použitým nákladům a vybavením pro experimentální zkoušky k ověření navrhované metodiky. Pro průmyslové nasazení by bylo nutné zvolit buď přesnější externí zařízení na odečítání polohy, nebo využívat odměřovací systém implementovaný v řídicím systému obráběcího stroje.

V následujícím kroku budou odvozeny chyby rotační desky získané ze signálu snímačů s1 a s2. Tyto hledané parametry  $\delta_{Rx}(\varphi)$ ,  $\delta_{Ry}(\varphi)$ ,  $\delta_{Rz}(\varphi)$ ,  $\alpha_R$ ,  $\beta_R$ ,  $E_{Rx}$ ,  $E_{Ry}$ ,  $E_{Rz}$ , vychází z následujícího odvození.

Když,  $\delta_{Rx,2}(\varphi) > \delta_{Rx,1}(\varphi)$ ,  $\delta_{Ry,2}(\varphi) > \delta_{Ry,1}(\varphi)$  potom platí:

$$\delta_{Rx,1}(\varphi) = \delta_{Rx}(\varphi) \quad (21).$$

$$\beta_R(\varphi) = \operatorname{atan}\left(\frac{\delta_{Rx,2}(\varphi) - \delta_{Rx,1}(\varphi)}{h}\right) \quad (22).$$

$$\delta_{Ry,1}(\varphi) = \delta_{Ry}(\varphi) \quad (23).$$

$$\alpha_R(\varphi) = \operatorname{atan}\left(\frac{\delta_{Ry,2}(\varphi) - \delta_{Ry,1}(\varphi)}{h}\right) \quad (24).$$

$\delta_{Rz}(\varphi)$  se skládá ze dvou složek, z hodnoty získané přímo ze snímače Sz a dále ze složky vzniklé z naklopení desky kolem osy X a Y. Důležité pro identifikaci velikosti chyby vzhledem k rotační desce je přepočítat velikost chyby od naklopení desky právě od nulového bodu, tj. na průniku bodu osy rotace a roviny desky.

– přepočet chyby na snímači

$$\delta z_{\beta R}(\varphi) = \sin \alpha. \delta_{Rx,2}(\varphi) \quad (25).$$

- přepočet chyby na snímači

$$\delta z_{\alpha R}(\varphi) = \sin \alpha. \delta_{Ry,2}(\varphi) \quad (26).$$

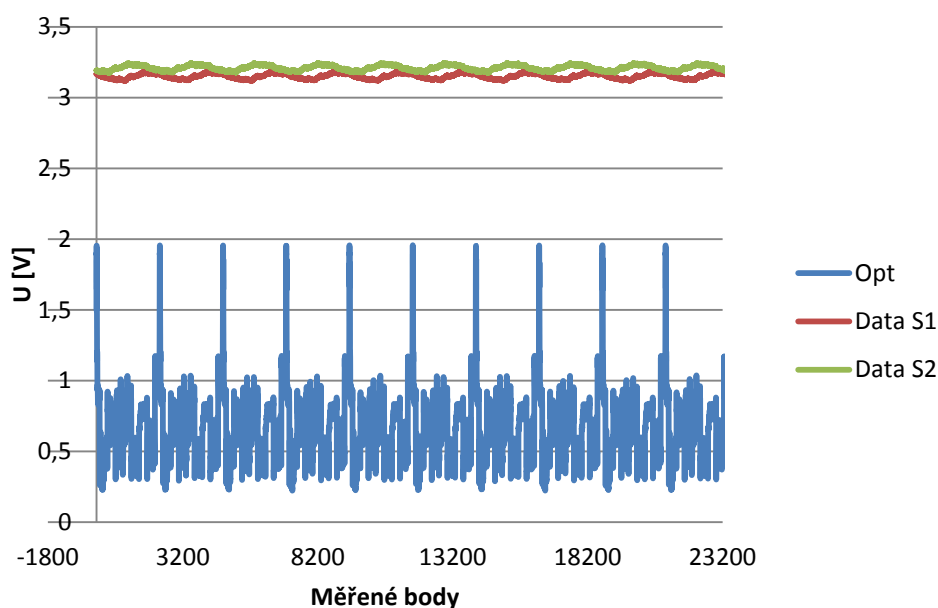
Stanovení parametrů pro svislý soustruh SKIQ30, v.č. 1604 pro otáčky řady D, tj. 130ot/min. Upravené soubory pro převod do dat pro Matlab odpovídají značení 1\_D1.xls, 1\_D2.xls, 1\_Dz.xls. Pro práci v softwaru Matlab jsou načítány pod data1D1.mat, data1D2.mat a data1Dz.mat.

Upravené hodnoty pro konvertování do SW Matlab mají uspořádání dle následujícího obrázku (soubor 1\_D1.xls). Zde bylo vybráno 9 otáček z důvodů zjednodušení úlohy. Pro další měření by se vycházelo z maximálního počtu získaných hodnot, které by byly použitelné.

|   | Úhel        | Čas      | Data<br>s1 | Data<br>s2 | Opto     |   |   | s1       | s2       |
|---|-------------|----------|------------|------------|----------|---|---|----------|----------|
|   | A           | B        | C          | D          | E        | F | G | H        | I        |
| 1 | 0           | 0,044141 | 3,18837    | 3,165531   | 1,499122 |   |   | -172,649 | -156,997 |
| 2 | 0,153649168 | 0,044336 | 3,188884   | 3,166039   | 1,626219 |   |   | -173,002 | -157,345 |
| 3 | 0,307298335 | 0,044531 | 3,189383   | 3,166924   | 1,742048 |   |   | -173,344 | -157,951 |
| 4 | 0,460947503 | 0,044727 | 3,189614   | 3,167421   | 1,83709  |   |   | -173,502 | -158,292 |
| 5 | 0,614596671 | 0,044922 | 3,190093   | 3,16804    | 1,902254 |   |   | -173,83  | -158,716 |
| 6 | 0,768245839 | 0,045117 | 3,190137   | 3,168522   | 1,888683 |   |   | -173,86  | -159,047 |
| 7 | 0,921895006 | 0,045313 | 3,190518   | 3,1684     | 1,924861 |   |   | -174,122 | -158,963 |
| 8 | 1,075544174 | 0,045508 | 3,190728   | 3,16818    | 1,953891 |   |   | -174,265 | -158,812 |
| 9 | 1,229193342 | 0,045703 | 3,190766   | 3,167982   | 1,954141 |   |   | -174,291 | -158,676 |

Obr. 96 Upravená data v Excel pro převod do MATLAB.

U souboru 1\_D1 se jedná o cca. 23 000 měřených bodů/snímač, které odpovídají 9 otáčkám desky stolu. Zde jsou graficky zobrazena všechna data z daného souboru, která představují hodnoty napětí na s1, s2 a opto. Z grafu (Obr. 97) je vidět rozsah napětí pro opto člen, u kterého je nutné definovat velikost složky pro identifikaci polohy. V tomto případě byla vybrána hodnota 1,5V. Hodnota prvního sloupce (Úhel) byl získán přepočtem ze známých počtu bodů na 1/ot. Čas odpovídá hodnotě při sepnutí snímání, která není rovna počátku natočení desky svislého soustruhu. Data s1, Data s2 a opto jsou „surová“ data získaná z měření, přičemž data s1 a data s2 musí být přepočítána podle kalibrované citlivosti snímačů dle vztahu:



Obr. 97 Upravená data pro jednu otáčku rotační desky.

$$s1 = k_1 * Data\ s1 + k_2 \quad (27).$$

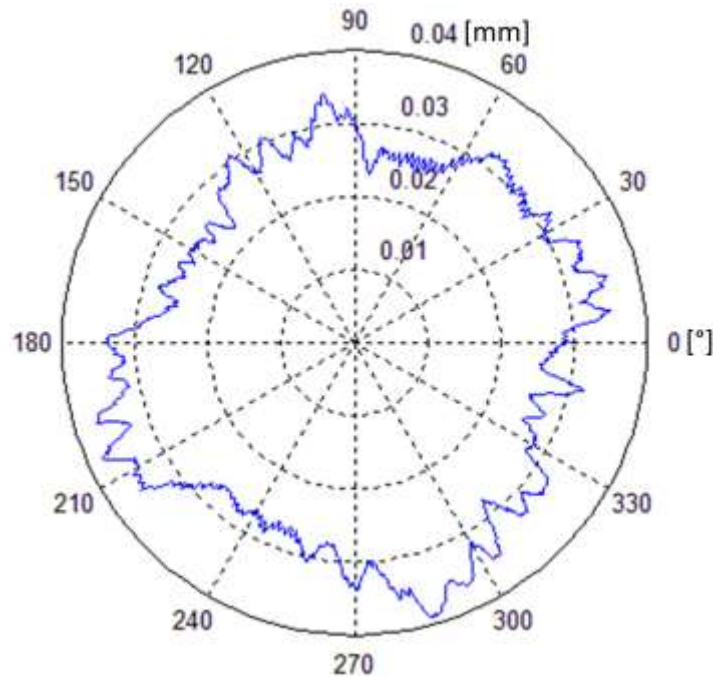
A obdobně pro s2

$$s2 = k_3 * Data\ s2 + k_4 \quad (28).$$

, kde konstanty k1-k4 odpovídají hodnotám z provedené kalibrace a po přepočtu již výsledné hodnoty odpovídají posunutí v  $\mu\text{m}$ .

Dalším krokem je konvertování dat do souboru data1D1.mat pro práci v SW Matlab. Zde mohou být konvertovány buď všechny hodnoty a dostaneme matici o velikosti 25 770x9 pouze pro soubor dat 1D1.

Po matematických úpravách obdržíme výsledek ve formě polárního diagramu s vypočtenou střední hodnotou, maximální a minimální výchylkou (Obr. 98).



Obr. 98 Polární diagram z dat snímačů S1 a S2 v rovině 1.

$$(S2_x(\varphi_z) - S1_x(\varphi_z)) = \delta_{Rx}(\varphi_z) \quad (29).$$

$$\arctan\left(\frac{\delta_{Rx}(\varphi_z)}{h}\right) = \delta_{\beta R}(\varphi_z) \quad (30).$$

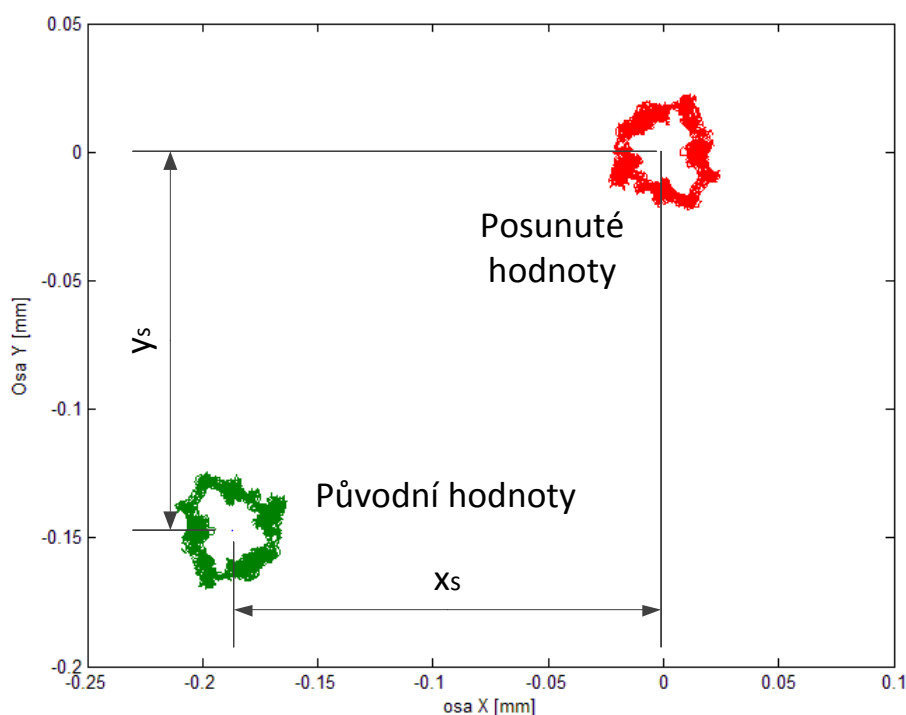
Dalším řešeným problémem je samotné vyhodnocení naměřených dat. Do výsledků se zavádí vědomě chyby od geometrie, ustavení trnu a nastavení polohy snímačů vůči trnu. Chyba ustavení snímačů se projeví vyosením měřených dat od počátku souřadného systému grafu a to v obou měřených rovinách 1 a 2. Eliminace této chyby se provádí matematickou úpravou, kde posunutý střed je dán rovnicemi pro osu X a Y:

$$x_s = \frac{\sum_{i=1}^N S1_x}{N} \quad (31).$$

$$y_s = \frac{\sum_{i=1}^N S1_y}{N} \quad (32).$$

, kde hodnoty  $S1_x$  a  $S1_y$  jsou data z jednoho měření v jedné rovině a  $N$  je počet naměřených dat.

Z měřeného souboru je potom pro každou hodnotu v datovém souboru proveden odečet posunu středu o  $x_s$  a  $y_s$ . Tento krok se provádí pro každý zpracovaný datový soubor z měření. Tím bude eliminována chyba zapříčiněná nedostatkem snímačů a nutností jejich přestavováním z roviny 1 do roviny 2 (Obr. 99).



Obr. 99 Posunutí středu  $R_m$  o  $X_s$  a  $Y_s$ .

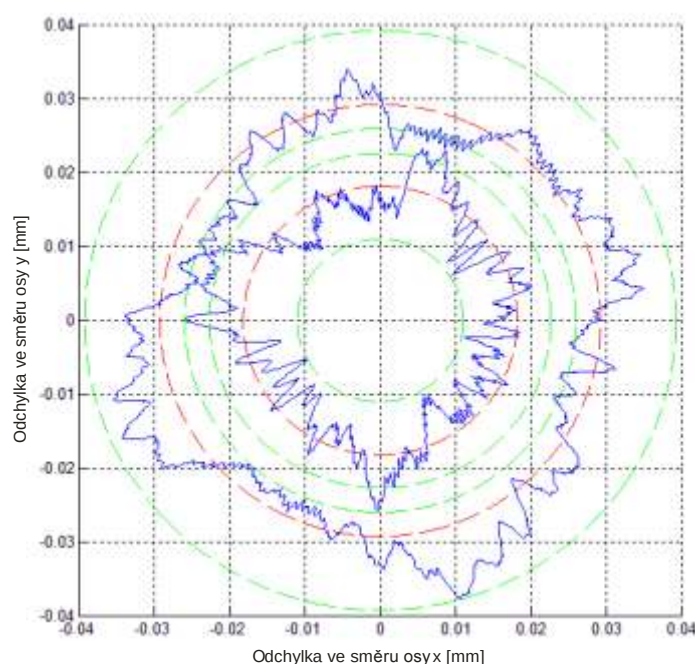
Další chybou zanesenou do měření je chyba od ustavení měřicího trnu a jeho geometrické přesnosti. Jednou z možností přístupu měření je zjistit na CMM geometrické chyby trnu a ty zanést do sestaveného modelu pro výpočet chyb svislého soustruhu jednoduchým odečtem. Chyba ustavení trnu na stroji by zde ale dále přetrvávala. Druhou možností jak tyto chyby eliminovat je, že bude provedeno měření za velmi nízkých otáček, bez zatížení (v našem případě za stavu 1A1, 1A2, 1Az) a tyto hodnoty brát jako referenční. Ostatní měření (např. 1D1, 1D2, 1Dz) s ní budou srovnávány.

Aby bylo možné provést srovnání, musí být definovány odchylky pro soubory 1A a 1D. Výpočet odchylek  $\Delta r_x$  a  $\Delta r_y$  vychází ze stanovení střední kružnice v polárním diagramu definovanou v publikaci [42] pomocí Simpsonovy metody a definován vztahem (pro rovinu 1 –  $R_{m1}$ ):

$$R_{m1} = \sqrt{\frac{1}{6N} \left[ 2x_{1D1centr(\varphi=0)}^2 + 4 \sum_{k=0}^{N-1} \left( x_{1D1centr(\varphi=(2k+1)\frac{\pi}{N})}^2 + y_{1D1centr(\varphi=(2k+1)\frac{\pi}{N})}^2 \right) + \right.} \quad (33).$$

$$\left. + 2 \sum_{k=0}^{N-1} \left( x_{1D1centr(\varphi=2k\frac{\pi}{N})}^2 + y_{1D1centr(\varphi=2k\frac{\pi}{N})}^2 \right) \right]$$

, podobně se provede výpočet pro  $R_{m2}$  souboru 1D2. V polárním diagramu lze potom současně zobrazit hodnoty  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$ , maximální a minimální odchylky jednotlivých rovin (viz. Obr. 100.).



**Obr. 100 Polární diagram 1D1 a 1D2.**

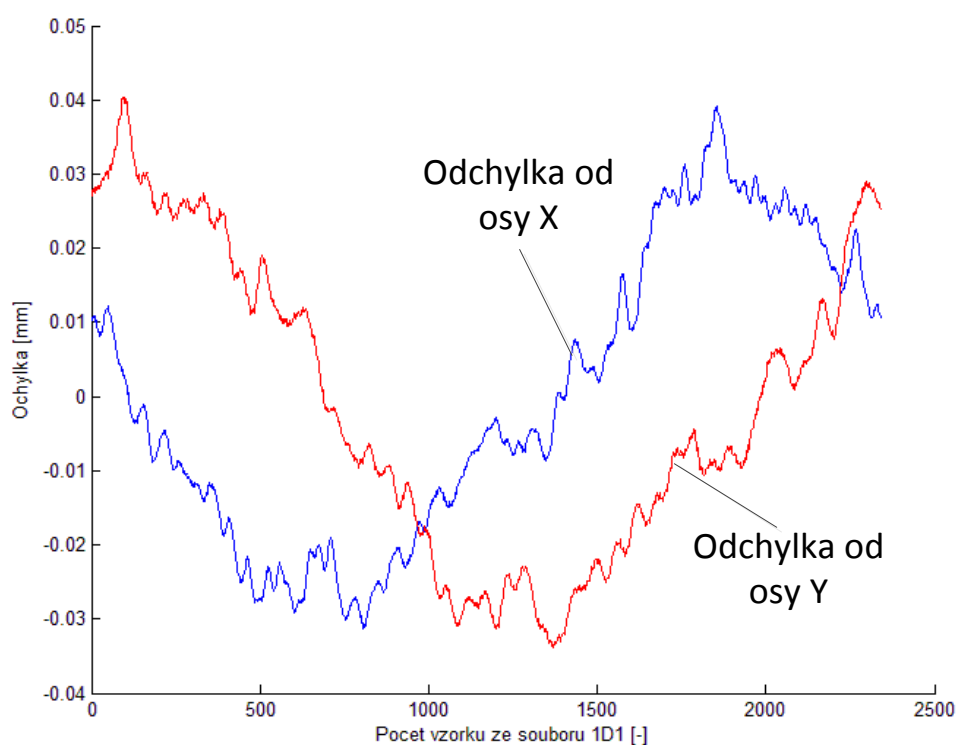
Hledanou odchylku je možné získat další matematickou úpravou točení rotační desky, a to dle vztahu:

$$\delta_{rxD1}(\varphi) = x_{1D1centr}(\varphi) - R_{m1} \cos(\varphi) \quad (34).$$

$$\delta_{ryD1}(\varphi) = y_{1D1centr}(\varphi) - R_{m1} \sin(\varphi) \quad (35).$$

Podobně se dopočítají hodnoty pro soubory 1A-1E a provedou se patřičné úpravy. Výsledky odchylek bez úprav jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 101).



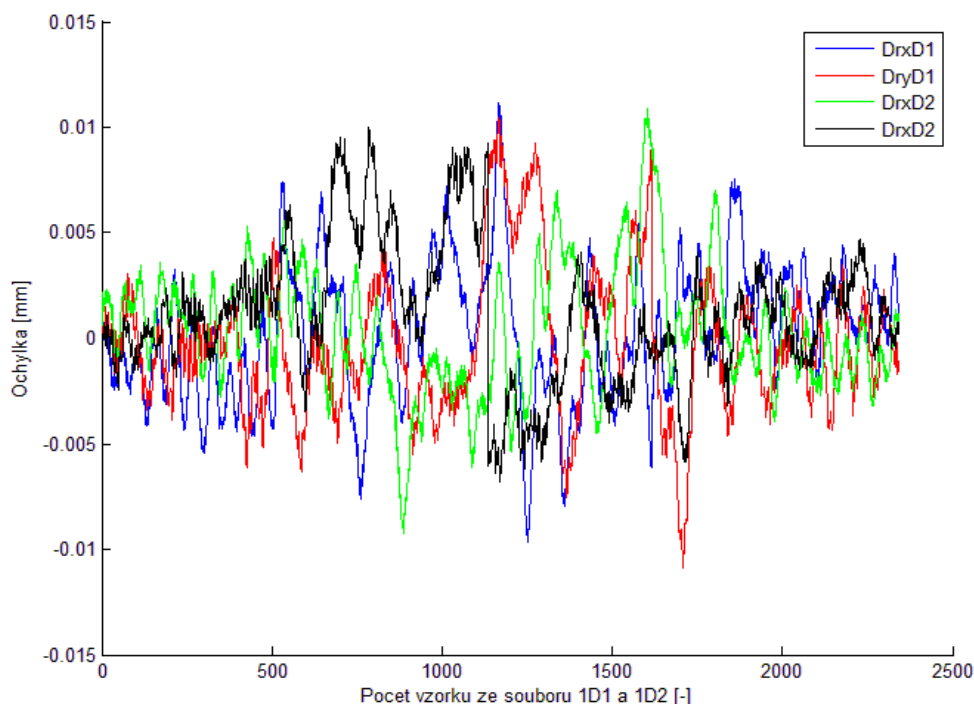


**Obr. 101 Neupravené odchylky osy X a Y.**

Na základě známých chyb z měření 1A1 a odečtu těchto hodnot (závislých na poloze) od měřených dostáváme data pro házení souboru 1D1 a 1D2 ve směrech os X a Y.

$$\delta_{rxD1\_real}(\varphi) = \delta_{rxD1}(\varphi) - \delta_{rxA1}(\varphi) \quad (36).$$

$$\delta_{ryD1\_real}(\varphi) = \delta_{ryD1}(\varphi) - \delta_{ryA1}(\varphi) \quad (37).$$



Obr. 102 Odfiltrované odchylky od měření A.

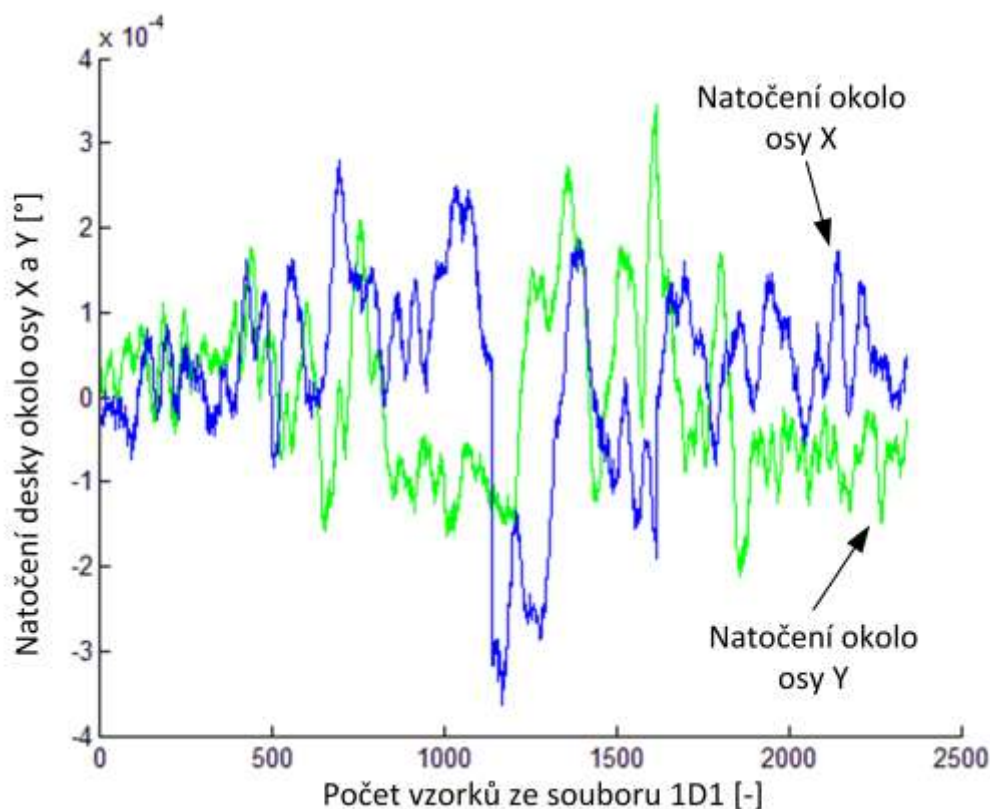
Ze získaných odchylek v rovinách 1 a 2 lze vyjádřit natočení desky stolu v závislosti na poloze rotační desky. Základní vztah pro natočení okolo osy Y je dán vztahem (37) nebo podle publikace [42], kde je vyjádřen úhel natočení desky dle vztahu (39).

$$\delta_{\beta R}(\varphi) = \operatorname{atan}\left(\frac{x_{1D2centr\_filtr}(\varphi) - \delta_{rxD1\_real}(\varphi)}{h}\right) \quad (38).$$

$$\delta_{\alpha R}(\varphi) = \operatorname{atan}\left(\frac{y_{1D2centr\_filtr}(\varphi) - \delta_{ryD1\_real}(\varphi)}{h}\right) \quad (39).$$

$$\delta_{\beta R}(\varphi) = \arctan\left[\frac{(R_{m2} + x_{1D2centr}(\varphi)) - (R_{m1} + x_{1D1centr}(\varphi))}{h}\right] - \arctan\left[\frac{R_{m2} - R_{m1}}{h}\right] \quad (40).$$

$$\delta_{\alpha R}(\varphi) = \arctan\left[\frac{(R_{m2} + y_{1D2centr}(\varphi)) - (R_{m1} + y_{1D1centr}(\varphi))}{h}\right] - \arctan\left[\frac{R_{m2} - R_{m1}}{h}\right] \quad (41).$$



Obr. 103 Průběh natočení desky okolo osy X a Y.

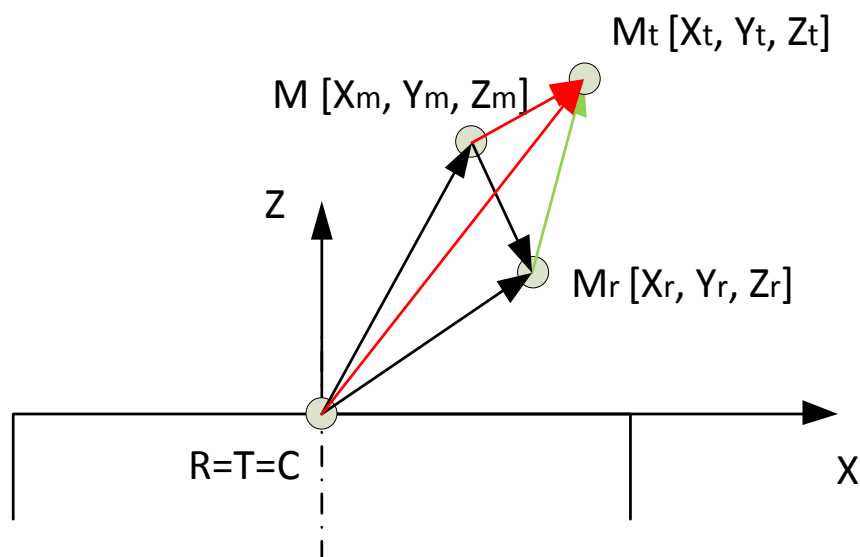
Z následujícího výpočtu vyplývá, že přepočet úhlu vychází velikostně stejně, jen je fázově posunut. Dále při použití filtrovaných hodnot (odfiltrovaných od měření A) je z vykreslených hodnot patrné, že naklopení kolem os X a Y se mění v průběhu otáčky od  $-4 \times 10^{-4}^\circ$  až po  $+4 \times 10^{-4}^\circ$ . Tedy maximální odchylka způsobená naklopením osy tvoří na výšce jednoho metru  $\pm 0,007$  mm v příslušném směru.

#### 6.4.5 Celková odchylka ideálního bodu rotační desky od skutečně definované chybami z naměřených hodnot

Celková odchylka skutečného bodu na stroji je od ideálního bodu dána chybou vzniklou na rotační desce  $M_r [X_r, Y_r, Z_r]$  a chybou vzniklou v lineárních osách  $M_t [X_t, Y_t, Z_t]$ . Výsledná velikost odchylky je dána  $M_t$  a  $M_r$  rozloženou do jednotlivých os a je definována  $E [E_x, E_y, E_z]$ .

Celková chyba  $E$  je potom dána vztahem:

$$E = M_r + M_t \quad (42).$$



Obr. 104 Definování výsledné chyby svislého soustruhu.

Po identifikaci všech potřebných chyb ( $\delta_{Rx}$ ,  $\delta_{Ry}$ ,  $\delta_{Rz}$ ,  $\delta_{\varphi_x}$ ,  $\delta_{\varphi_y}$ ) vyvozených rotační deskou bude následovat přepočítání na celkovou chybu rotační desky danou pouze odchylkami v kartézských souřadnicích ( $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$ ). Máme-li definovaný ideální bod v prostoru rotační desky, která se chová nestabilně, vzniknou vlivem dříve jmenovaných chyb odchylky od definovaného ideálního bodu.

Ideální bod  $M$  má v souřadném systému rotační desky  $R$  souřadnice  $M = [X_m, Y_m, Z_m]$ . Hodnota  $X_m$  převedená na budoucí obrobek vyjadřuje jeho poloměr,  $Y_m$  je vždy rovno nule a  $Z_m$  je výška obrobku od uložení na rotační desce. Maticový zápis ideálního bodu  $M$  je:

$$M = \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix} \quad (43).$$

Skutečná poloha osy rotace má ovšem polohu posunutou o házení v příslušných směrech  $T = [\delta_{Rx}, \delta_{Ry}, \delta_{Rz}]$  a má dále naklonené osy o  $\delta_{\varphi_x}$ ,  $\delta_{\varphi_y}$ . Odvozená rovnice kinematiky v prostoru pro identifikaci bodu  $M_r$  v počátečním souřadném systému rotační desky má tvar:

$$M_r = R \cdot M + T \quad (44).$$

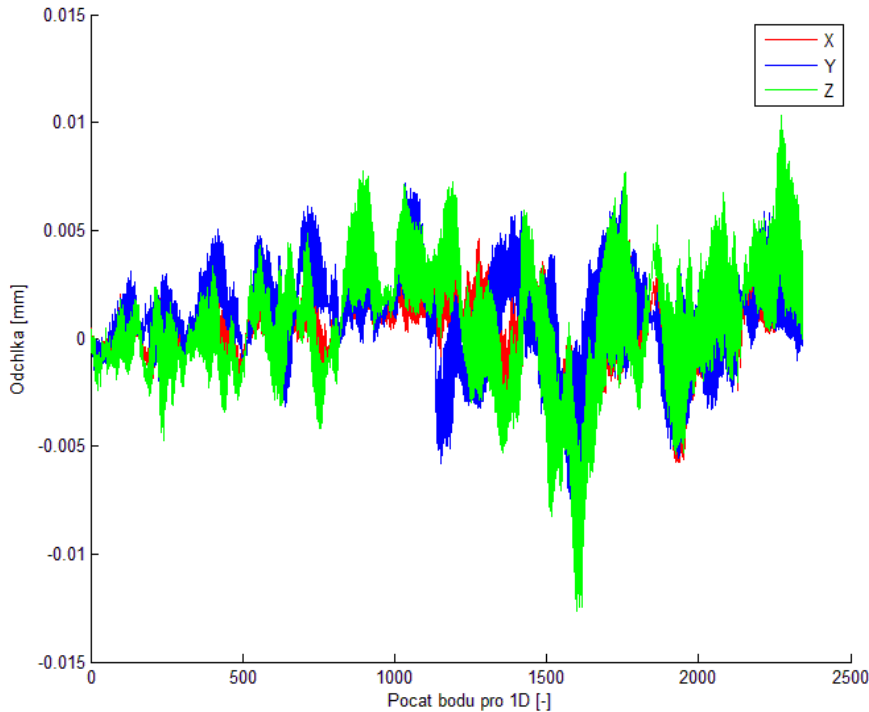
, kde  $R$  má tvar pro natočení kolem osy  $X$  a  $Y$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \delta_{\varphi y} & \sin \delta_{\varphi y} \sin \delta_{\varphi x} & \sin \delta_{\varphi y} \cos \delta_{\varphi x} \\ 0 & \cos \delta_{\varphi x} & -\sin \delta_{\varphi x} \\ -\sin \delta_{\varphi y} & \cos \delta_{\varphi y} \sin \delta_{\varphi x} & \cos \delta_{\varphi y} \cos \delta_{\varphi x} \end{pmatrix} \quad (45).$$

Výsledná rovnice má tvar:

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_{\varphi y} & \sin \delta_{\varphi y} \sin \delta_{\varphi x} & \sin \delta_{\varphi y} \cos \delta_{\varphi x} \\ 0 & \cos \delta_{\varphi x} & -\sin \delta_{\varphi x} \\ -\sin \delta_{\varphi y} & \cos \delta_{\varphi y} \sin \delta_{\varphi x} & \cos \delta_{\varphi y} \cos \delta_{\varphi x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta R_x \\ \delta R_y \\ \delta R_z \end{pmatrix} \quad (46).$$

Ze získaných hodnot je možné využít informace např. pro sledování rotační desky, jako samostatně sledované soustavy obráběcího stroje a sledovat odchylky od ideální polohy bez ohledu na lineární soustavu svislého soustruhu. Tyto výsledky jsou vhodné pro sledování vývoje a konstrukční vyspělosti rotačních os, sledování slabých míst, atd. Druhé využití je právě pro predikování chování celého stroje a to součinnosti rotační desky a lineární soustavy svislého soustruhu.



**Obr. 105** Výsledné odchylky od ideálního bodu v souřadném systému rotační desky.

Na obrázku je vidět graf znázorňující všechny odchylky rotační desky od ideálního bodu, přičemž maximálních hodnot nabývá odchylka ve směru osy Z (Obr. 105).

Z prvního řešení lze sledovat jednotlivá posunutí ovlivněná rotační deskou na výšce a průměru budoucího obrobku. Zde se jedná o sledování ideálního bodu M v pracovní části rotační desky. Touto částí bude prostor vymezený obdélníkem o rozměrech:

$$X_m \in \langle 0, X_{m_{\max}} \rangle$$

$$Y_m = 0$$

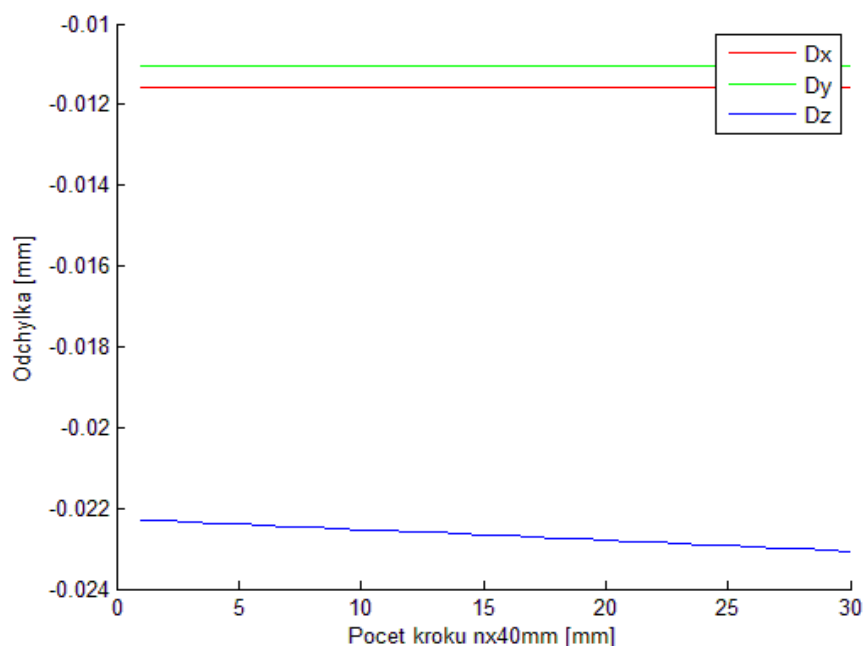
$$Z_m \in \langle 0, Z_{m_{\max}} \rangle$$

, kde  $X_{m_{\max}}$  je maximální poloměr obrobku, který je možné upnout na rotační desku a  $Z_{m_{\max}}$  je jeho maximální výška. Na následujícím obrázku (Obr. 106) je zobrazena chyba, která je dána souřadnicemi:

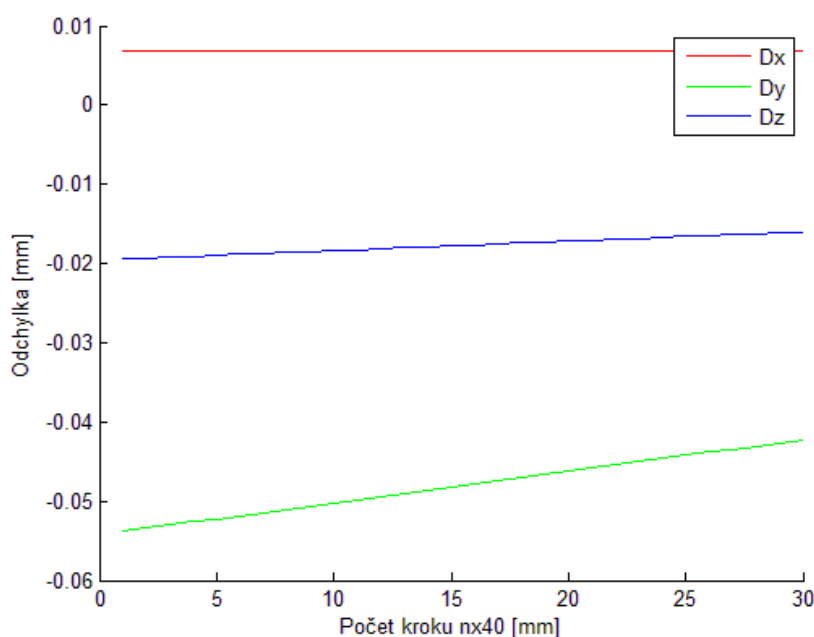
$$X_m \in \langle 0, 1160 \rangle$$

$$Y_m = 0$$

$$Z_m \in \langle 662 \rangle$$



Obr. 106 Velikosti odchylek TCP při posuvu v ose X bez zatížení 1D.



Obr. 107 Velikosti odchylek TCP při posuvu v ose X při zatížení 2D.

Chyby Dx a Dy jsou ve srovnání s velikostí chyby Dz téměř konstantní. Osa X představuje definovanou vzdálenost 0-1160mm, která je podělená krokem 40mm. Tyto chyby jsou výsledným posunutím od ideálního bodu ovlivněné řešenými chybami rotační desky.

Dalším předpokladem zajištění vyšší přesnosti získaných chyb rotační desky, je další rozbor a zpracování statistických metod do vytvořeného programu pro zpracování měřených dat. Dále úpravou stávajícího měřicího zařízení a především možnost ověřit metodiku na více strojích.

#### 6.4.6 Celková chyba od translace a rotace

Translace v pracovním prostoru svislého soustruhu

Stanovení chyby TCP bylo definováno v kapitole 6.4.3. Zpracovaná data jsou zanesena do rovnice (42)  $M = M_r + M_t$ . Chyba  $M_t$  může být vyjádřena na základě potřeby dle tabulek exportovaných z měření Laser Trackerem nebo ze zpracovaných hodnot, které vyjadřují odchylku získanou závislostí např. na výsuvu smykadla ( $z$ ):

$$\delta Y_T = (-0,0001 \cdot z - 0,054)mm \quad (47).$$

$$\delta X_T = (0,00005 \cdot z - 0,0322)mm \quad (48).$$

Chyba najetí z-osy je dána měřením pomocí laserinterferometru s  $\delta Z_T$

$$(P) = 7,105 \mu m,$$

Při posuvu suportu (x):

$$\delta Y_T = (0,00001 \cdot x - 0,0408)mm \quad (49).$$

$$\delta Z_T = (0,00000006 \cdot x + 0,0031)mm \quad (50).$$

Chyba najetí x-osy je dána měřením pomocí laserinterferometru s  $\delta X_T$

$$(P) = 17,049 \mu m$$

Celková odchylka od ideální polohy nabývá hodnot dle vztahu:

$$E = Mr + Mt = R \cdot M + T + Mt \quad (51).$$

$$E = \begin{pmatrix} \cos \delta_{\varphi y} & \sin \delta_{\varphi y} \sin \delta_{\varphi x} & \sin \delta_{\varphi y} \cos \delta_{\varphi x} \\ 0 & \cos \delta_{\varphi x} & -\sin \delta_{\varphi x} \\ -\sin \delta_{\varphi y} & \cos \delta_{\varphi y} \sin \delta_{\varphi x} & \cos \delta_{\varphi y} \cos \delta_{\varphi x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Xm \\ Ym \\ Zm \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta Rx \\ \delta Ry \\ \delta Rz \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta X_T \\ \delta Y_T \\ \delta Z_T \end{pmatrix}, \quad (52).$$

Kde vektor

$$E = \begin{pmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \end{pmatrix} \quad (53).$$

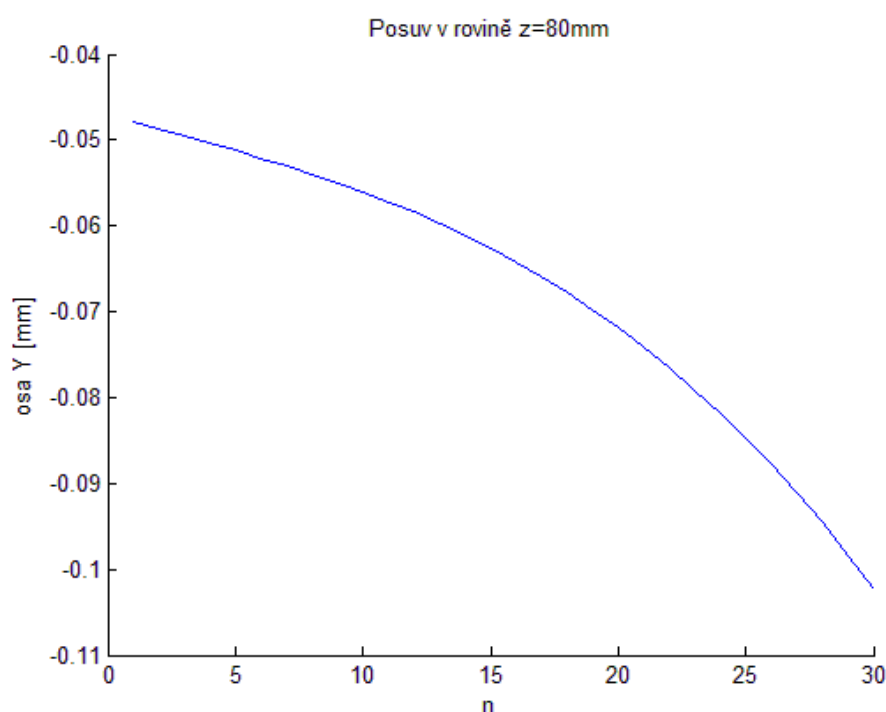
- E1 odpovídá chybě v ose X
- E2 odpovídá chybě v ose Y
- E3 odpovídá chybě v ose Z



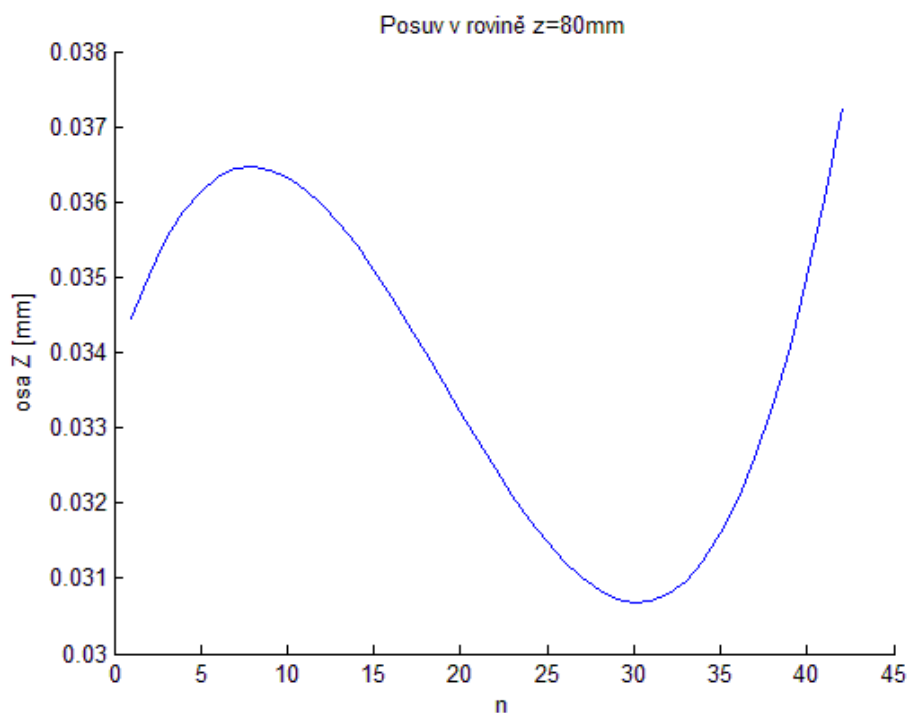
Pro ukázkou byl zvolen pojezd v ose X, přičemž smykadlo bylo nastaveno na konstantní polohu  $z = 80 \text{ mm}$ ,  $z = 360 \text{ mm}$ ,  $z = 760 \text{ mm}$ . Pojezd osy X byl nastaven v rozsahu 0-1640 mm s předem definovaným krokem 40 mm. V následující tabulce je vypočtena celková chyba odpovídající vektoru E (proložena polynomem 3.řádu).

## Provoz 1D

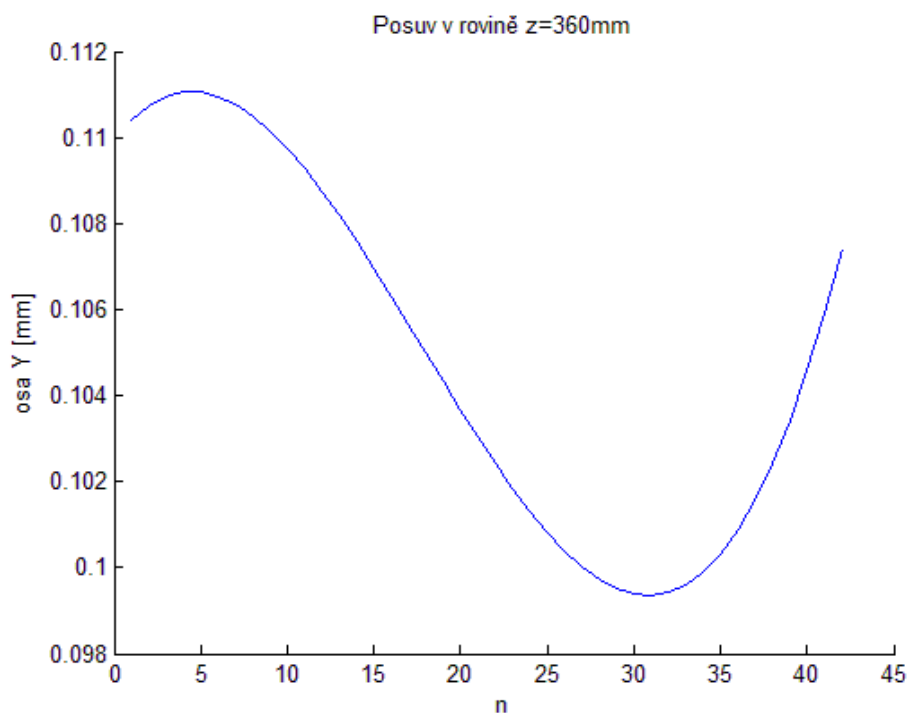
$n \dots$  poloha suportu = počet kroků  $\times 40 [\text{mm}]$ .



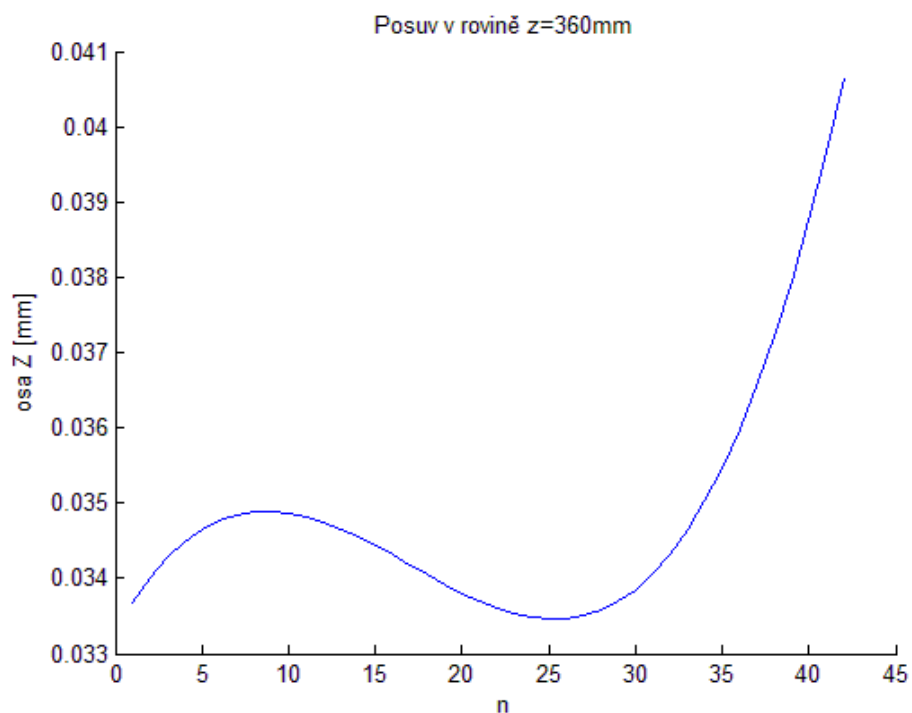
Obr. 108 Výsledná velikost odchylky v ose Y při  $z = 80 \text{ mm}$  mezi TCP a obrobkem při 1D.



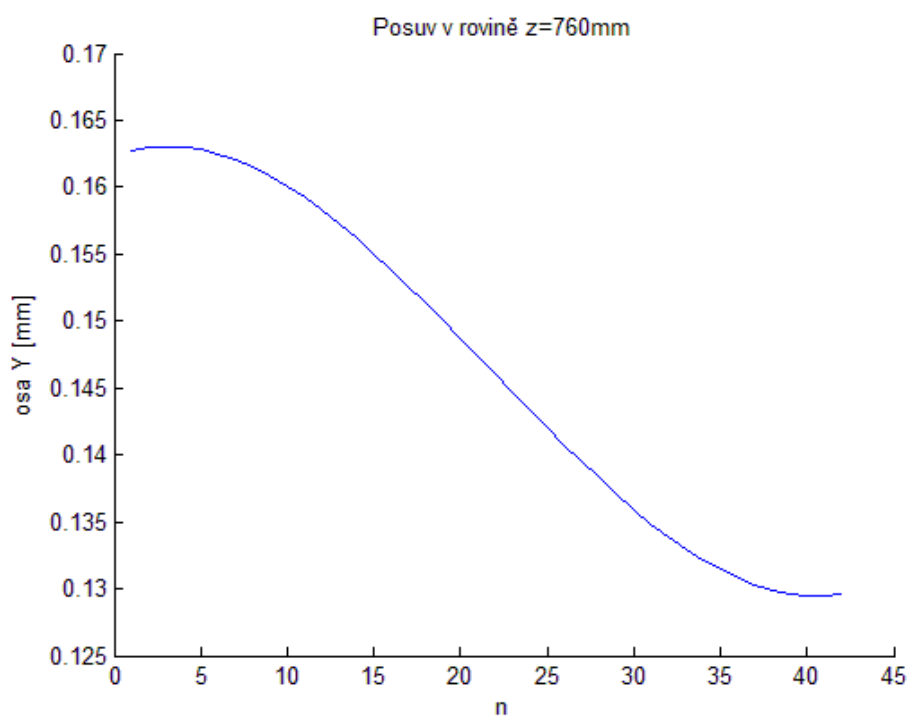
Obr. 109 Výsledná velikost odchylky v ose Z při  $z = 80\text{ mm}$  mezi TCP a obrobkem při 1D.



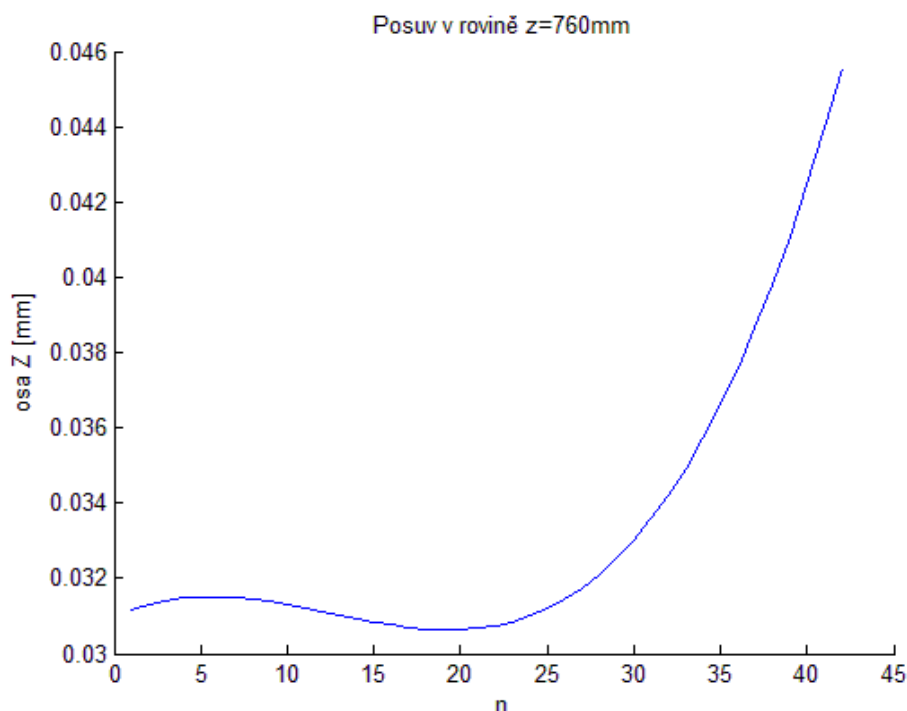
Obr. 110 Výsledná velikost odchylky v ose Y při  $z = 360\text{ mm}$  mezi TCP a obrobkem při 1D.



Obr. 111 Výsledná velikost odchylky v ose Z při  $z = 360$  mm mezi TCP a obrobkem při 1D.



Obr. 112 Výsledná velikost odchylky v ose Y při  $z = 760$  mm mezi TCP a obrobkem při 1D.

Obr. 113 Výsledná velikost odchylky v ose Z při  $z = 760$  mm mezi TCP a obrobkem při 1D.

Tab. 7 Maximální a minimální odchylky pro vybraný pohyb TCP – 1D.

| <b>Z</b><br><b>[mm]</b>                    | <b>80</b>  |            | <b>360</b> |            | <b>760</b> |            |
|--------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                            | <b>min</b> | <b>max</b> | <b>min</b> | <b>max</b> | <b>Min</b> | <b>Max</b> |
| <b><math>E1 \times 10^{-2}</math> [mm]</b> | 2.8249     | 2.8249     | 2.8435     | 2.8435     | 2.8700     | 2.8700     |
| <b><math>E2 \times 10^{-1}</math> [mm]</b> | 0.47955    | 1.6881     | 1.1105     | 0.99347    | 1.2944     | 1.6305     |
| <b><math>E3 \times 10^{-2}</math> [mm]</b> | 3.0678     | 3.7240     | 3.3456     | 4.0651     | 3.0633     | 4.5563     |

Rovinnost obráběné plochy je dána minimální a maximální výchylkou v ose Z. Pro případ obrábění čelní plochy obrobku při konstantní výšce TCP jsou získány tyto hodnoty.

Když byly dále průběhy naměřených dat linearizovány, tzn. že byly vynechány špičky, které extrémně vybočovali z řady, byla obdržena tabulka:

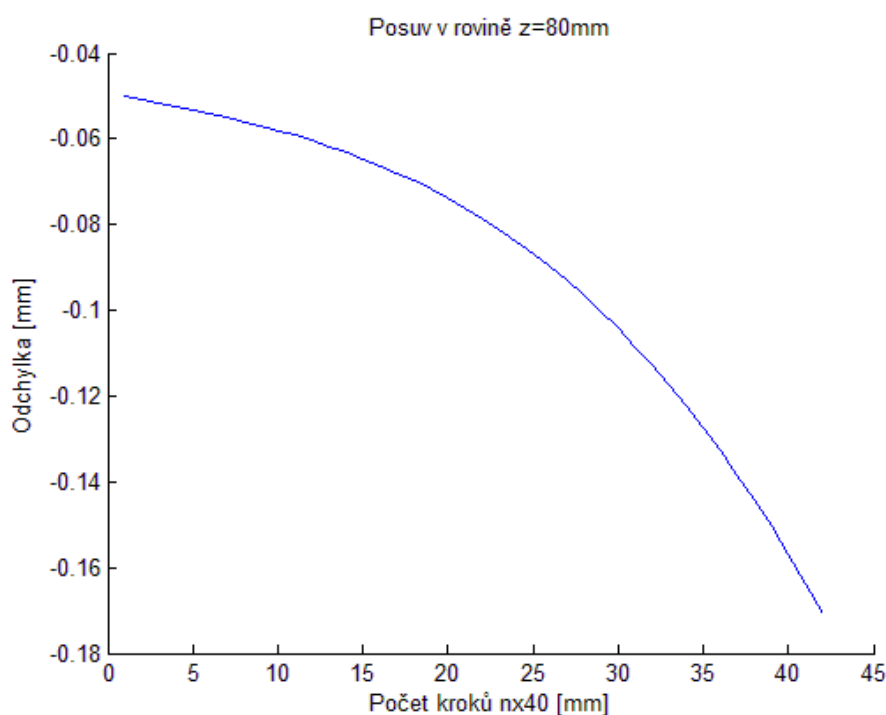
Tab. 8 Chyby na budoucím obrobku – 1D.

| <b>Z</b><br><b>[mm]</b> | <b>Přímost</b><br><b>[mm]</b> | <b>Přímost - filtr</b><br><b>[mm]</b> |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| <b>80</b>               | $6.562 \times 10^{-3}$        | 0.003                                 |
| <b>360</b>              | $7.195 \times 10^{-3}$        | 0.008                                 |
| <b>760</b>              | $1.493 \times 10^{-2}$        | 0.011                                 |

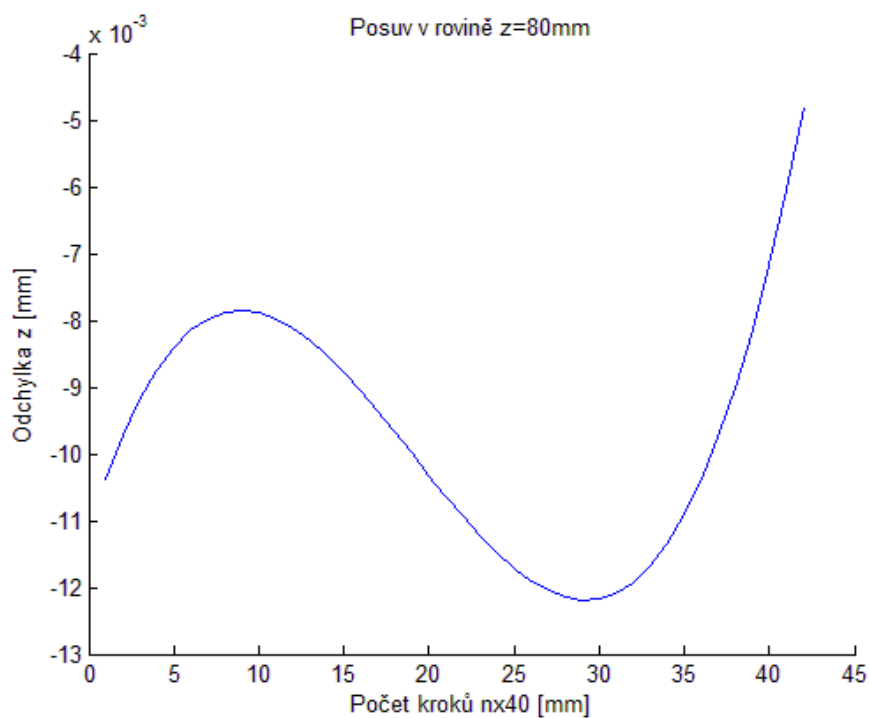
Stejný postup se provede pro zkušební podmínky 2D a 3D. Další zpracované informace jsou už pouze z 2D, hodnoty pro 3D nejsou kompletní z časové náročnosti a dostupnosti testovaného stroje. Byly získány informace pouze o posuvech v rovinách X a Y.

Získané informace o stroji vypovídají o jeho chování pod definovanou zátěží (otáčky stolu, hmotnost obrobku).

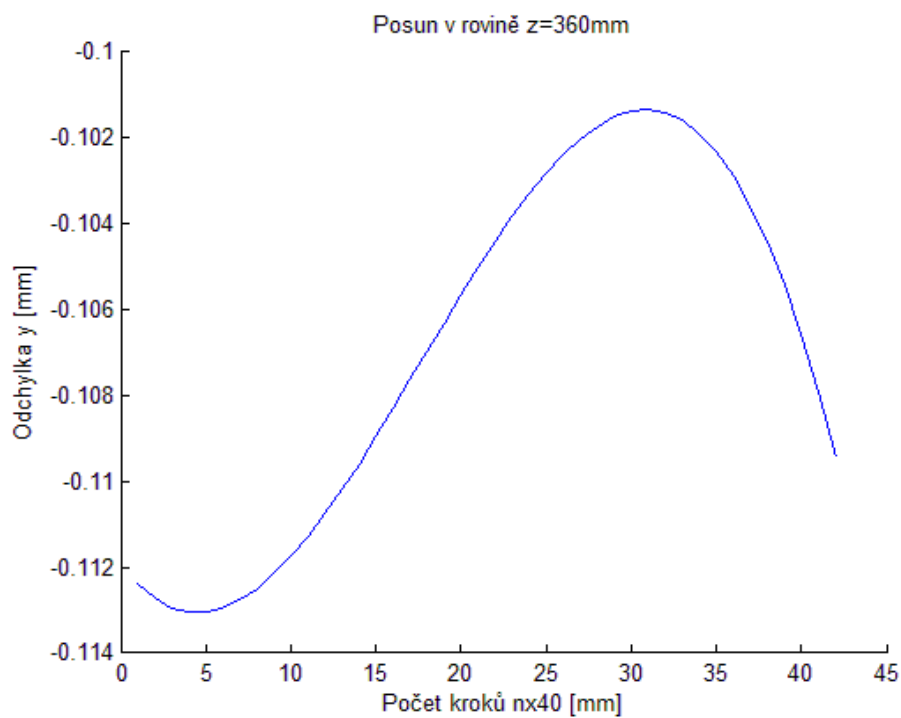
## Provoz 2D



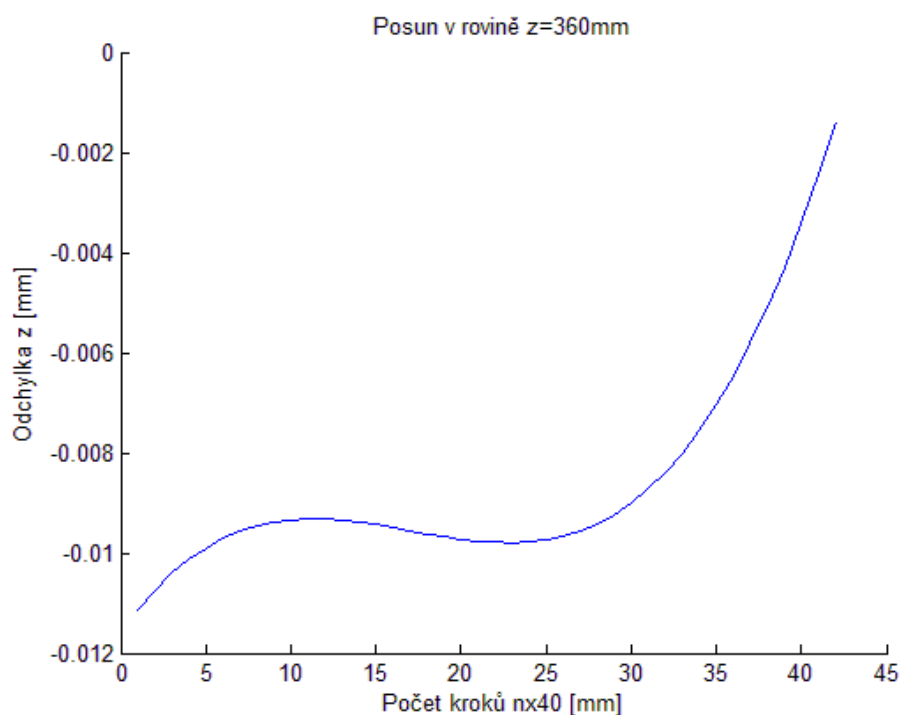
Obr. 114 Výsledná velikost odchylky v ose Y při z = 80 mm mezi TCP a obrobkem při 2D.



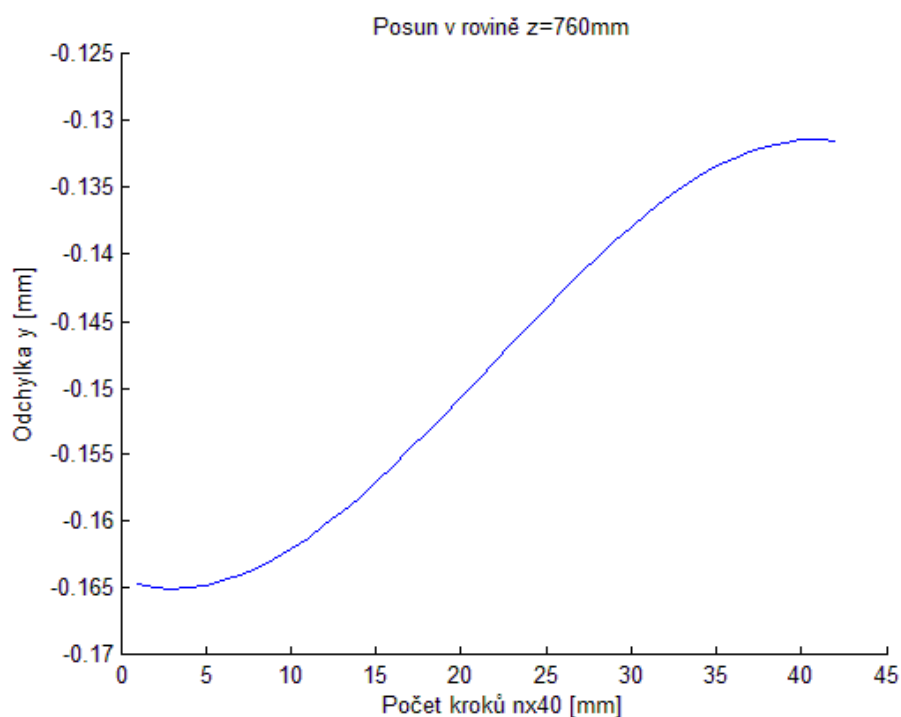
Obr. 115 Výsledná velikost odchylky v ose Z při z = 80 mm mezi TCP a obrobkem při 2D.



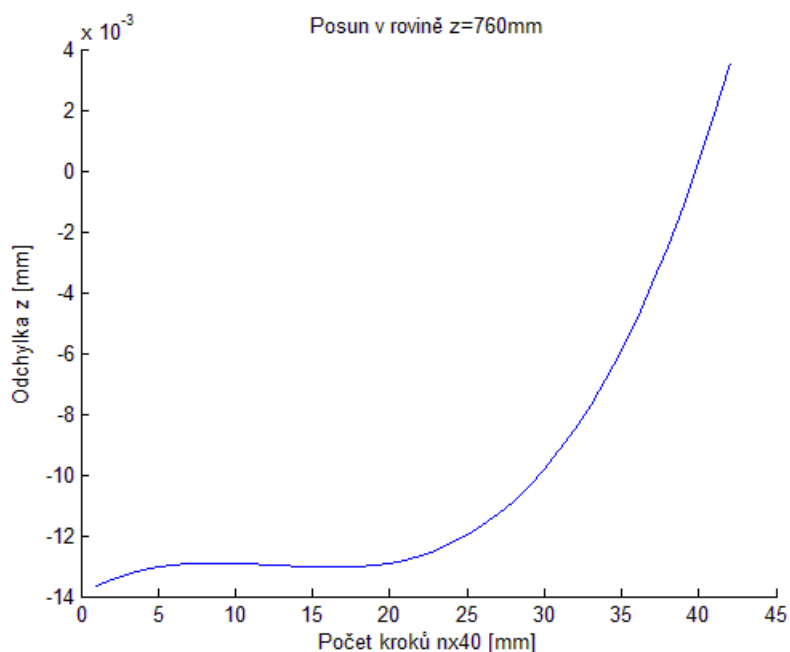
Obr. 116 Výsledná velikost odchylky v ose Y při z = 360 mm mezi TCP a obrobkem při 2D.



Obr. 117 Výsledná velikost odchylky v ose Z při  $z = 360$  mm mezi TCP a obrobkem při 2D.



Obr. 118 Výsledná velikost odchylky v ose Y při  $z = 760$  mm mezi TCP a obrobkem při 2D.



Obr. 119 Výsledná velikost odchylky v ose Z při z = 760 mm mezi TCP a obrobkem při 2D.

Tab. 9 Maximální a minimální odchylky pro vybraný pohyb TCP – 2D.

| Z<br>[mm]               | 80      |          | 360     |          | 760     |         |
|-------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|
|                         | min     | max      | min     | max      | Min     | Max     |
| $E1 \cdot 10^{-3}$ [mm] | 5.5273  | 5.5273   | 6.1904  | 6.1904   | 7.1377  | 7.1377  |
| $E2 \cdot 10^{-1}$ [mm] | -1.7082 | -0.49963 | -1.1305 | -1.0135  | -1.6504 | -1.3143 |
| $E3 \cdot 10^{-2}$ [mm] | -1.2193 | -0.47927 | -1.1141 | -0.13823 | -1.3662 | 0.35298 |

Tab. 10 Tab. 8 Chyby na budoucím obrobku – 2D.

| Z<br>[mm] | Přímost<br>[mm]          | Přímost - filtr<br>[mm]  |
|-----------|--------------------------|--------------------------|
| 80        | $7.4003 \times 10^{-3}$  | $8.8044 \times 10^{-3}$  |
| 360       | $9.7587 \times 10^{-3}$  | $5.5234 \times 10^{-3}$  |
| 760       | $17.1918 \times 10^{-3}$ | $12.0841 \times 10^{-3}$ |



#### 6.4.7 Negativní faktory ovlivňující přesnost vyhodnocených dat

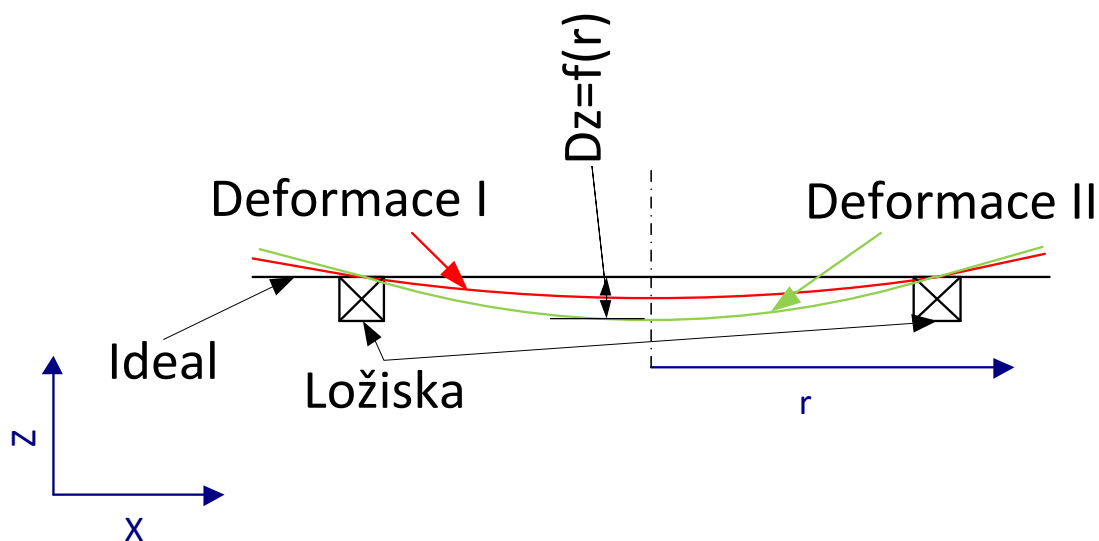
Jak bylo v předchozích kapitolách řečeno, existuje ještě celá řada faktorů, které ovlivňují přesnost vyhodnocených dat. V průběhu dalšího vývoje měřicího zařízení je nezbytně nutné se věnovat všem negativním faktorům a zajistit tak stabilitu celého měření. Jelikož cílem práce bylo navrhnout metodiku pro měření svislého soustruhu, nebyl v této práci komplexně řešen návrh měřicí jednotky.

V průběhu řešení dizertační práce bylo provedeno několik měření na svislém soustruhu, frézovacím stroji, i na zkušebním zařízení, ze kterých byly zjištěny faktory negativně ovlivňující výsledky měření. Nejedná se pouze o faktory založené na principech změny teploty, čistoty prostředí, nevhodné geometrie měřicího trnu, ale také na postupu zpracování získaných dat, zvolených algoritmech, atd. Vzhledem k rozsahu řešení práce a získaných informací je možné učinit dílčí závěry, které by měly být při dalším zpracování bezpodmínečně řešeny.

Celé měření svislého soustruhu bylo časově velmi náročné a trvalo 21 hodin. Tento fakt byl zapříčiněn nedostatečným počtem snímačů. To zapříčinilo prodloužení času měření, jelikož muselo být pro každé měření provedeno 2x přestavení snímačů pro každou rovinu. Neustálým přestavováním snímačů byla také vědomě snížena výsledná přesnost celého měření.

Dále bylo z důvodů prvního a jediného měření rotační desky zjištěno, že při startu měření nebyly dostatečně konstantní otáčky a tudíž musely být odfiltrovány. Z těchto prvních poznatků je zřejmé, že pro další zpracování je nezbytně nutné mít k dispozici pět snímačů a kontrolu stability otáček pro stanovení vhodného spuštění testu.

V rámci neustálého vývoje měřicí jednotky, navrhuji s kolegy několik variant uchycení snímačů a vhodnějšího tvaru měřicího trnu. Celý proces měření, jak bylo již řečeno, byl dlouhodobý proces, během kterého mohlo dojít k tepelnému ovlivnění sledované soustavy. Vlivem takového ovlivnění vznikají posunutí a deformace na rotační desce, které mohou negativně ovlivnit výsledky měření a tudíž i hledané vlastnosti stroje, popř. budoucího obrobku (viz. Obr. 120).



Obr. 120 Chování rotační desky.

Je zřejmé, že hodnoty zjištěné na měřicím trnu odpovídají posunutím na středu desky. Pro obrobek s poloměrem  $r$  menším, než je poloměr uložení ložisek, se hodnoty posunutí pohybují v záporných číslech. Naopak posunutí v oblasti nad poloměr uložení se dostávají do kladných hodnot. Tento problém se může vyskytovat u způsobů zatížení desky a tím ovlivní její průhyb, popř. posunutí. Řešením je nasazením několika těles v rovinách  $X$  a  $Y$  na desce svislého soustruhu a sledovat výchylku v ose  $Z$ , například skloubením vhodně umístěných teplotních snímačů by bylo možné sledovat závislost průhybu, tvar průhybu a jeho velikost na teplotě (Obr. 123).

Dalším prvkem, který snižuje přesnost celého systému, je optický senzor, který v průběhu měření nahrazoval odměřování rotační desky. Po konzultacích by byla měřicí jednotka při pravidelném nasazení do kontrolního procesu připojena k řídicímu systému a informace o poloze a otáčkách by byly odečítány přímo ze stroje. Tím by došlo opět ke zvýšení přesnosti vyhodnocení parametrů a také k výraznému zjednodušení zpracování. Jelikož by byla definována otáčka přímo z řídicího systému, odpadl by celý sloupec pro zpracování dat, a dále nutná a složitá identifikace otáčky desky stolu.

Prvek, který může také ovlivnit výslednou přesnost naměřených hodnot je jednotka pro úpravu signálu a napájení. I když tato jednotka byla navržena tak, aby bylo co nejmenší ovlivnění zpracovaného napětí, je možné, že k nějakému ovlivnění mohlo dojít. Jedna z variant odstranění tohoto prvku je pořídit se snímači současně jednotku pro zpracování signálu a napájení, kde výrobce deklaruje přesnost celého zařízení (snímač + jednotka). Nevýhodou je pouze vysoká pořizovací cena této jednotky.

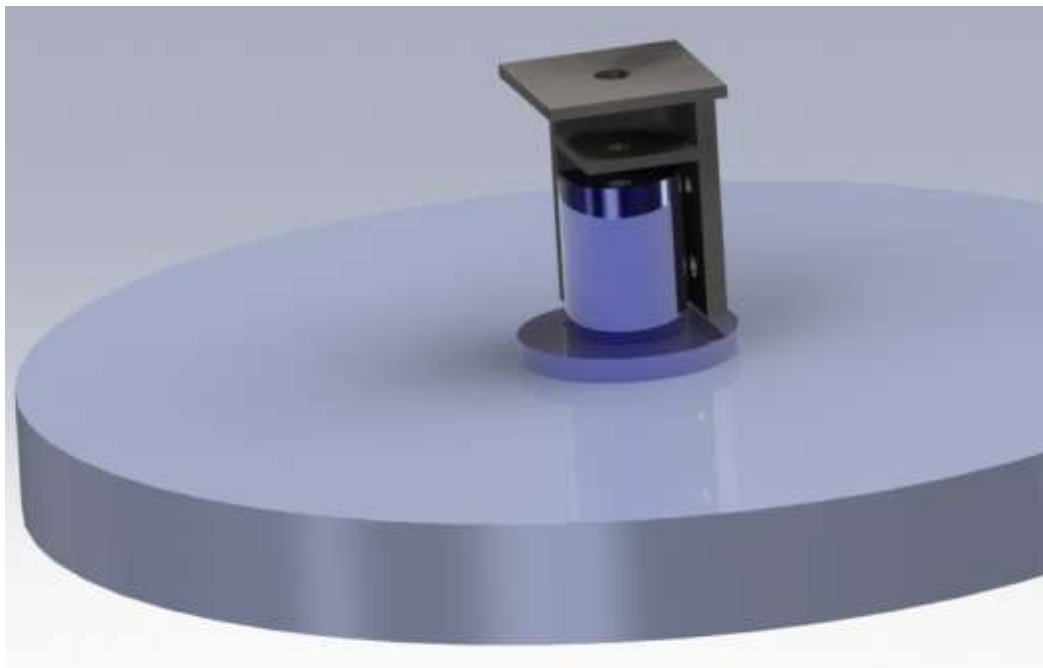
Výše uvedené hypotézy je možné dále postupně ověřovat ve spolupráci s firmou TOSHULIN.

### ***Modifikace návrhu měřicí jednotky pro rotační desku***

Z měření vybraných vlastností rotační desky na stroji SKIQ30 byla zpětně provedena analýza, na základě které byl proveden předběžný návrh úprav měřicí jednotky. Modifikace měřicí jednotky spočívá v možnosti zaznamenat více parametrů ovlivňujících přesnost chodu rotační desky svislého soustruhu, a tudíž přímo ovlivňujících geometrickou přesnost budoucího obrobku. Dále byl proveden předběžný návrh na změnu tvaru a funkčnosti držáku na bezkontaktní snímače. Tímto krokem se zjednoduší manipulace a upínání do nástrojové hlavy svislého soustruhu. Současně bylo provedeno několik variant modifikace měřicího trnu navržených pouze na aplikaci sledování geometrické přesnosti svislého soustruhu bezkontaktními snímači. Úprava předpokládá, že bude k dispozici 5-9 bezkontaktních snímačů zapojených současně.

Těmito úpravami bude zajištěno přesnějšího geometrického popisu desky svislého soustruhu.

V následujícím obrázku je modifikován držák bezkontaktních snímačů, který zajistí snadnější manipulaci celkového ustavení měřicí jednotky. Držák je již upraven tak, aby odpovídal původnímu zkušebnímu trnu, tak i modifikovaného zkušebního trnu.



**Obr. 121** Návrh úpravy přípravku pro uchycení bezkontaktních snímačů.

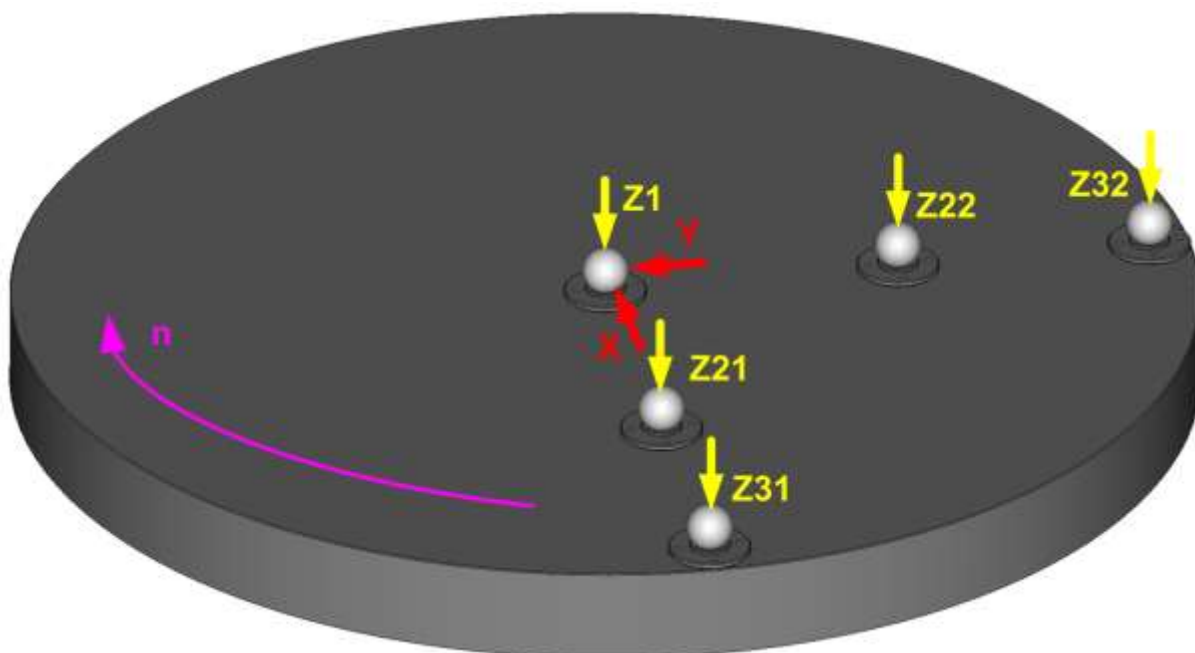
Modifikace trnu byla provedena na základě zvýšení požadavků na jeho geometrickou přesnost. Jednodušší a přesnější variantou je možnost nahradit válcovou plochu tělesy ve tvaru koule. V úvahu byl brán fakt, že výroba tělísek do valivých ložisek je dobře známá a zpracovaná, která by zde mohla být nasazena. Dále byl návrh inspirován tří bodovým ustavením kulových ploch v systému double ball bar (DBB – Renishaw), který by zde šlo také aplikovat. Předběžný návrh je zobrazen na Obr. 122. Velikost a materiál těles by byl volen opět z požadavků výrobců bezkontaktních snímačů.



Obr. 122 Modifikace měřícího trnu.

Jak již bylo naznačeno u varianty se zkušebním trnem, je možné sledovat chování desky (posunutí, natočení, atd.), ale není možné identifikovat průhyb desky, který u velkých hmotností může hrát vysokou roli v přesnosti obrobku. Právě z prvního návrhu měření a identifikace chyb na desce svislého soustruhu vznikla další specifikace problému identifikace chyb na desce ze strany TOSHULIN (spolupráce s Ing. Synkem a Ing. Novotným, Ph.D.), a byla provedena další modifikace celého měření. Zatím pouze teoreticky zpracovaná část vychází z více měřených bodů rotační desky (viz. Obr. 123), kde jednotlivé posunutí na snímačích definují aktuální průhyb desky. Všechny tyto nastíněné úpravy s kombinací teplotních snímačů umožní predikovat chování desky právě na teplotě jednotlivých komponent desky. To je další bod řešení, kde se musí definovat sledovaná tělesa. Nevýhodou této metody je zvýšený počet bezkontaktních snímačů až na 9 oproti původním 5ti a také

implementaci teplotních snímačů do konstrukce rotační desky. Získaná data přinesou vysokou hodnotu informace o chování, ze kterého bude možné vycházet pro aktivní kompenzaci rotačních desek nejen svislých soustruhů.



Obr. 123 Modifikace měřicí jednotky pro sledování velkých rotačních desek.

## 6.5 VYUŽITÍ NAVRŽENÉ METODIKY MĚŘENÍ

Cílem experimentu bylo ověřit navrženou metodiku měření a navrženou měřicí aparaturu na svislém soustruhu. Ze získaných naměřených hodnot byly následně predikovány vlastnosti obrobení budoucího obrobku. Navržená metodika měření svislého soustruhu se skládá ze dvou základních částí, a to měření translačních a rotačních os. Aplikace navržené metodiky měření pro translační osy je teoreticky použitelná na každý obráběcí stroj využívající pouze tři translační pohyby. Vzhledem k použitému přístrojovému vybavení v experimentu nebude navržená aplikace vhodná pro velmi přesné stroje. Velké omezení vzniklo při nasazení přístroje Laser Trackeru a s ním spojené přesnosti měření. Aby bylo možné provést měření, musel být stroj měřen ve speciální poloze, které není možné dosáhnout u zakrytovaného stroje, popř. u strojů menších rozměrů. Na trhu se již objevil přístroj Laser Tracer (fa. Etalon) s vyšší přesností, který ale není pro měření a ověření k dispozici.

Navržená metodika měření a měřicí jednotka rotačních os je vhodná pro jakýkoliv pracovní rozměr rotační osy. Omezení nastane pouze u malých rotačních os při měření během zatížení od obrobku. S dalšími vývojovými pracemi na měřicí jednotce se ukazuje její vysoký potenciál a to ne pouze pro kontrolní měření, ale

také zabudování této jednotky do rotační desky. Výslednou aplikací by byla aktivní sledování chyb vzniklých od teploty, zatížení, řezných sil na rotační desce, přičemž by mohly být vybrané chyby ze získaných informací kompenzovány.

Při známém „geometrickém“ chování strojů a obrobení zkušebních obrobků je možné předpokládat závislost mezi „geometrickým“ chováním stroje, technologií obrábění a výslednou přesností obrobku. Navržená metodika měření odpovídá požadavkům na definování „geometrického“ chování stroje a získané výsledky jsou dále aplikovatelné pro predikování vlastností obrobení obrobku.

Získání závislosti mezi „geometrickým“ chováním obráběcího stroje a výslednou přesností obrobení patří mezi hlavní cíle této dizertační práce. Dlouhodobé sledování vybraných tolerancí tvaru na obrobku a simulací obráběcího stroje může vést právě k definování jisté závislosti mezi soustavou stroj-obrobek, z pohledu geometrického chování. Simulace provedená v kapitole 6.4.6 definuje chování stroje v průběhu posuvu nástroje v ose X vůči obrobku. Z obrobení definovanou technologií (dokončovací operací) a následnou kontrolou na CMM. Přímost získaná simulací daného stroje je rovna 0,003mm a skutečná naměřená 0,03mm. Zde byl získán první parametr mezi „geometrickým“ chováním stroje a obrobenou součástí. Při zavedení koeficientu pro obrobení stroje  $K_o$ , který je dán podílem skutečné hodnoty přímosti a teoretické (simulované hodnoty přímosti), získáme hodnotu, která vyjadřuje naše hledané „geometrické“ chování. V předloženém příkladu by tato hodnota  $K_o$  byla rovna 10. Pokud by se těmto zkouškám podrobilo více strojů z produkce firmy TOSHULIN, a prokázalo by se takovéto chování, bylo by potom pro výrobce celkem jednoduché predikovat vlastnosti obrobení budoucích obrobků.

## 6.6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Vzhledem k náročnosti na technické vybavení potřebné pro nasazení navržené metodiky měření na svislém soustruhu je nezbytnou součástí zpracování zohlednit také pořizovací náklady na potřebnou aparaturu.

Ekonomické zhodnocení bude rozděleno na tři části, a to pro firmu TOSHULIN, která již nějaké vybavení vlastní a není tudíž nutné započítávat tuto aparaturu do pořizovacích nákladů. Druhá rozvaha pořizovací ceny bude zahrnovat veškeré náklady na měřicí jednotku. Poslední varianta finanční rozvahy bude zahrnovat již navržené modifikace měřicí jednotky.

Tab. 11 Prvky pro stavbu měřicí jednotky.

|    | Prvek                               | Výrobce              | Počet kusů | Cena/ks          | Celkem Kč bez DPH |
|----|-------------------------------------|----------------------|------------|------------------|-------------------|
| 1  | Snímače                             | Micro-Epsilon        | 5          | 20 000           | 100 000           |
| 2  |                                     | Bruel and Kjaer      | 9          | 20 000           | 180 000           |
| 3  |                                     | Micro-Epsilon        | 9          | 20 000           | 180 000           |
| 4  | Vyhodnocovací jednotka              | Micro-Epsilon        | 2          | 105 000          | 210 000           |
| 5  | Vyhodnocovací jednotka              | Micro-Epsilon        | 3          | 105 000          | 415 000           |
| 6  | Vyhodnocovací jednotka              | National Instruments | 1          | 350 000          | 350 000           |
| 7  | Vyhodnocovací jednotka              | National Instruments | 1          | 450 000          | 450 000           |
| 8  | Snímače teplot                      | Micro-Epsilon        | 3          | 20 000           | 60 000            |
| 9  | Karta NI                            | National Instruments | 1          | 24 000           | 24 000            |
| 10 | SW LabVIEW                          | National Instruments | 1          | 100 000          | 100 000           |
| 11 | Elektronika pro kompletaci jednotky | Zakázková výroba     | 1          | 80 000           | 80 000            |
| 12 | Kalibrace jednotky, certifikace     | Služba               | 1          | Nebyla poptávána | Nebyla poptávána  |
| 13 | Držák + měřicí trn                  | Vlastní výroba       | 1          | 45 000           | 45 000            |

## Vliv geometrické přesnosti vybraných obráběcích center na požadované vlastnosti výrobků

|    |                   |          |   |           |           |
|----|-------------------|----------|---|-----------|-----------|
| 14 | PC                | DELL     | 1 | 30 000    | 30 000    |
| 15 | Laserintrferometr | Renishaw | 1 | 920 000   | 920 000   |
| 16 | Laser Tracer      | API      | 1 | 3 850 000 | 3 850 000 |

Cenové kalkulace jednotlivých variant měřicí aparatury:

**Varianta 1** =  $1 + 4 + 8 + 9 + 10 + 11 + 12 =$  580 000 Kč

**Varianta 2a** = Varianta 1 + 13 + 14 + 15 + 16 = 5 400 000 Kč

**Varianta 2b** =  $1 + 6 + 8 + 10 + 11 + 12 + 13 + 14 + 15 + 16 =$  5 540 000 Kč

**Varianta 3a** =  $3 + 5 + 6 + 8 + 10 + 11 + 12 + 13 =$  1 250 000 Kč

**Varianta 3b** =  $3 + 5 + 8 + 9 + 10 + 11 + 12 + 13 + 14 + 15 + 16 =$  5 700 000 Kč

**Varianta 3c** =  $2(3) + 7 + 8 + 10 + 11 + 12 + 13 + 14 + 15 + 16 =$  5 720 000 Kč

Varianta 1 odpovídá potřebnému pořízení pro potřeby firmy TOSHULIN k aplikaci navržené metodiky. Pořizovací cena varianty 3a je stanovena taktéž pro firmu TOSHULIN, ale s modifikovanou měřicí jednotkou.

Zbývající varianty (2a, 3b, 3c) jsou rozšířeny o prvky Laserinterferometru a Laser Trackeru, které jsou nutnou podmínkou pro sledování lineárních os obráběcích strojů.

Z pohledu pořizovací ceny se jedná o nutnou vysokou počáteční investici do přístrojového vybavení. Z hlediska rozložení pořizovacích nákladů činí samotný Laser Tracker téměř 70% z celkové pořizovací ceny a ve spojení s laserinterferometru tvoří 84% pořizovací ceny měřicí aparatury.

Z pohledu využití měřicí aparatury pouze pro diagnostiku chyb rotačních desek nejsou pořizovací náklady tak značné.

## 6.7 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP NÁVRHU METODIKY MĚŘENÍ SVISLÝCH SOUSTRUHŮ

V průběhu řešení dizertační práce byl sestaven návrh metodiky měření svislých soustruhů včetně prvotního návrhu měřicí aparatury k predikování požadovaných vlastností výrobků. Návrh této metodiky je zobrazen v následujícím vývojovém diagramu (Obr. 125).



První část vývojového diagramu „volba“ specifikuje skupinu obráběcích strojů, pro které je metodika navržena. V našem případě se jedná o skupinu svislých soustruhů s různými technickými parametry.

Druhá část „definování požadavků“ zahrnuje stanovení požadavků ze strany zákazníků na budoucí obrobek, ze kterých se definují vybrané požadavky na svislé soustruhy. Zde je nutné uplatnit dlouholeté zkušenosti zaměstnanců výrobní firmy, od kterých jsou definovány požadavky na svislé soustruhy. Současně zde byl svislý soustruh (soustava) rozdělen na dva subsystémy (rotační osa, translační osy), se kterými se nadále pracuje zvlášť. Rotační osa svislého soustruhu byla řešena s panem Synkem a translační osy s panem Škařupem (oba TOSHULIN, a.s.). Rozdělení jednotlivých úkolů je dáno složitostí systému a požadavky na obsluhu příslušných měřících aparatur poskytovaných ze strany výrobce.

Opět následuje bod vývojového diagramu „volba“, kde jsou z výrobního spektra vybrány rozměrově vhodné stroje definované např. průměrem rotační desky, velikostmi pojezdu, rozsahem otáček, nosností, atd. Volba rozměrů vychází opět z požadavků zákazníka.

Následující krok „definování požadavků“ musí respektovat dosahovanou pracovní a geometrickou přesnost svislých soustruhů z celého výrobního programu výrobce. Po identifikaci jednotlivých prvků sledovaného systému je možné definovat požadavky na měření z hlediska přesnosti a hledaných parametrů.

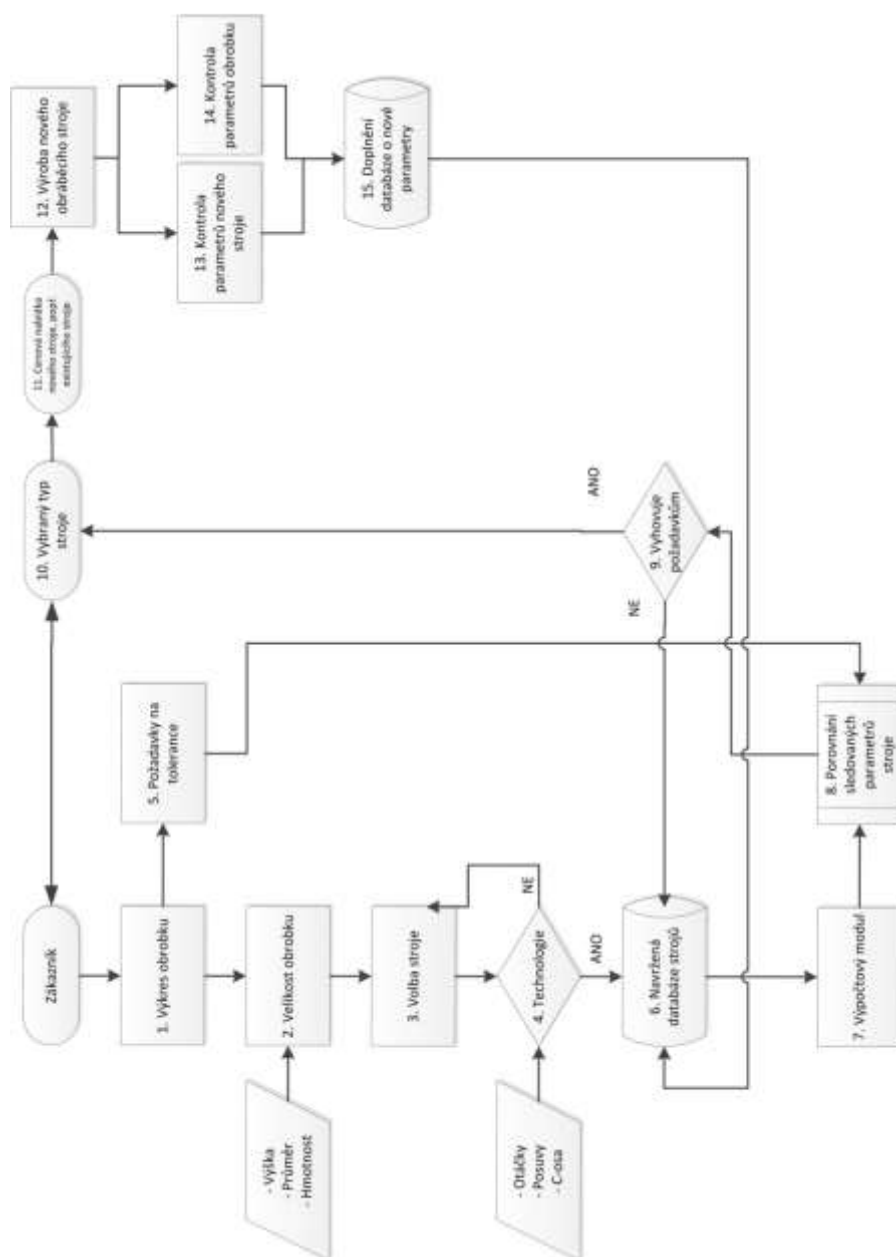
„Funkční vývojová etapa“ obsahuje nejen řešerši různých přístupů k vyhodnocování geometrických, pracovních a kinematických chyb na stroji dle norem, vnitřních předpisů firmy a technik publikovaných v odborné literatuře, ale také potřebné přístrojové vybavení nacházející se na pracovišti VUT v Brně, TOSHULIN a především obecně na trhu. Výsledné řešení musí respektovat předchozí krok (dosahované přesnosti jednotlivých strojů). Koncové řešení aktuálního kroku jsou vhodně zvolené dostupné přístroje, popř. navržené vlastní měřící aparatury a vývoj potřebného softwaru pro vyhodnocení požadovaných vlastností stroje.

Po sestavení měřící aparatury a přístupu k samotnému měření nastává opět blok „rozhodování“, ve kterém se vhodně zvolí nastavení parametrů pro měření. Zde hraje velkou roli zkušenost realizačního týmu. Při nevhodné volbě parametrů lze během jednoho měření získat velké množství naměřených dat, která jsou velmi náročná na další zpracování.

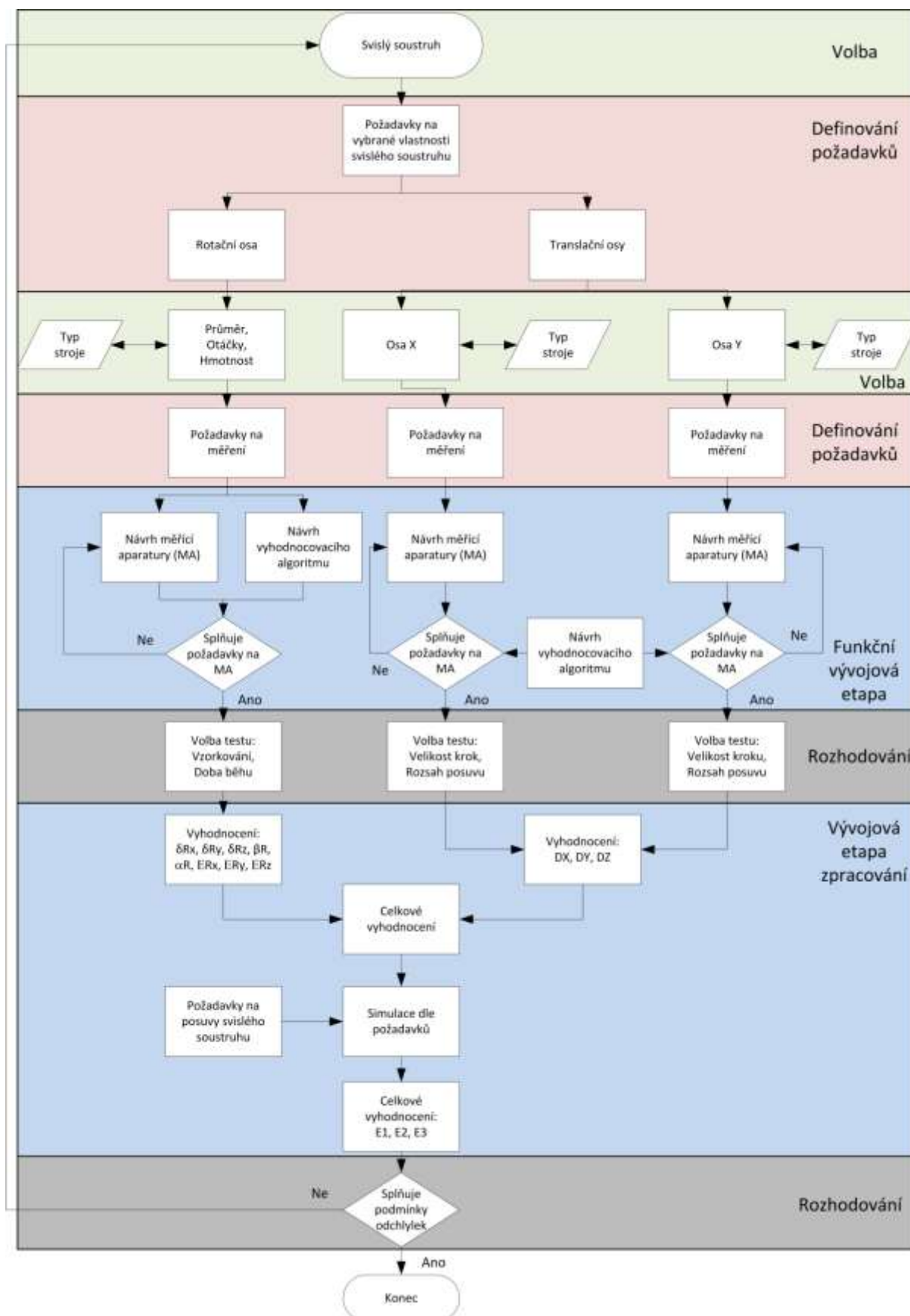
Další krok „vývojová etapa zpracování“ v sobě zahrnuje výpočtovou část již definované kinematiky svislého soustruhu translačních a rotačních os. Současně jsou do modelu zaneseny požadované pohyby nástroje vůči obrobku definovaného z požadavků zákazníka. Obdržené hodnoty výsledných odchylek vypovídají o budoucím chování zvoleného stroje a predikují vybrané vlastnosti obrobení obrobku.

V posledním kroku vývojového diagramu „rozhodování“ se určí, zda je stroj vhodný pro zvolenou aplikaci, či nikoli. V druhém případě se celý cyklus opakuje pro jiný typ stroje (již bez vývojových etap, jedná-li se o svislý soustruh). Lze předpokládat, že rozhodovací část ovlivní z velké části zkušenosti realizačního týmu.

Nasazení navržené metodiky do cyklu volby vhodného svislého soustruhu zákaznickovy je závislé od dostupných interních informací a stávajících strojů. Postup při realizaci může následovat dle vývojového diagramu (Obr. 124), který byl již uveden na počátku práce v kapitole 6.1. Dá se tedy říct, že postup výběru a stanovení cenové nabídky svislého soustruhu zákazníkovi bude hodně záviset na zkušenostech celého realizačního týmu.



Obr. 124 Vývojový diagram pro předběžný návrh volby obráběcího centra dle požadavků zákazníka



Obr. 125 Vývojový diagram návrhu metodiky měření a měřicí aparatury

## 7 PŘÍNOS PRÁCE

Metodika měření a zpracování informací o CNC obráběcích strojích si klade za cíl usnadnit výrobcí obráběcích strojů zkvalitnění přístupu procesu pro konfiguraci a stanovení nabídky nového stroje, která vychází z požadavků zákazníků. Vedle cíle volby optimálního stroje pro definovaný obrobek snižuje navržená metodika měření také celkovou dobu pro stanovení nabídky svislého soustruhu.

Ze získaných informací navrženou metodikou měření je schopen výrobce definovat požadavky na jednotlivé konstrukční celky, popř. komponenty dodávaného svislého soustruhu. Výsledkem je vyrobený svislý soustruh, pracující v podmínkách definovaných zákazníkem s minimalizací časů pro nutné kontroly a úpravy na stroji vzniklé z nedostatků informací výrobního procesu (požadavcích na přesnost konstrukčních celků, komponent).

Současně s výše uvedenými přínosy práce pro praxi je blízce spojena zvýšená kvalita služeb zákazníkům, která využívá nejnovějších technologií pro kontrolu svislých soustruhů a po rozšíření předložené práce, možnosti sledování „geometrického“ chování rotační desky v celém pracovním cyklu stroje.

Informace sloužící k predikování budoucího obrobku jsou upotřebitelné ve vývoji a konstrukci testovaných strojů, ale především v oblasti stanovení konečné nabídky zákazníkovi. Zpracované hodnoty vypovídají o „slabých“ místech obráběcího stroje, které by bylo vhodné konstrukčně upravit. Taktéž data mohou sloužit pro srovnávání a sledování vybraných parametrů při vývoji nových nosných struktur, komponent, atd.

Dále je uvažováno navrženou metodiku přizpůsobit pro běžnou kontrolu svislých soustruhů, jak u výrobce v TOSHULIN, tak i pro kontrolu u zákazníků. Tento bod zjednoduší náročnost na přípravu a dobu měření rotačních desek svislých soustruhů a dále získá více informací o jejich chování.

Během řešení dizertační práce byla nastíněna možnost využít navržené měření rotačních desek pro implementaci celé aparatury k online diagnostice a pro kompenzaci vybraných chyb rotační desky.

V oblasti pedagogické pak řešení a výsledky práce představují přínos zapojením vysokoškolských studentů do aktuálně řešené problematiky v průmyslové sféře, formou zpracování diplomových a bakalářských prací. Dále jsou na rok 2011/2012 vypsána témata diplomových prací na rozšíření dizertační práce v oblasti návrhu softwaru k navrženému měření. Na rok 2012 byl sepsán projekt FRVS na zavedení měření včetně obráběcích strojů pomocí bezkontaktních snímačů do výuky, který má za cíl studentům přiblížit problematiku chodu včetně obráběcích strojů.

## 8 ZHODNOCENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cíle předložené dizertační práce vyplynuly převážně z požadavků průmyslové sféry zastoupené prof. Jiřím Markem (fa. TOSHULIN, a.s.), který současně působí jako profesor na VUT v Brně, FSI.

Stanovení cílů dizertační práce definovaných v roce 2009 se jeví ze současného pohledu jako vhodně zvolené a nadčasové. Tyto závěry lze podložit prezentacemi získanými z konference CIRP konané v roce 2011 v Budapešti. Zde byly předloženy návrhy témat v oblasti výrobních „měření a kompenzace velkých CNC obráběcích strojů,“ které by se měly řešit v následujícím několikaletém období.

Zpracování dizertační práce návrhu metodiky měření a měřicího zařízení vychází ze systémového přístupu definovaného kapitole 4

V úvodních kapitolách byl specifikován obráběcí stroj, za který byl zvolen svislý soustruh SKIQ30 z produkce firmy TOSHULIN, a.s. Po jeho specifikaci a technických možnostech byly provedeny rešerše s cílem vymezit rozsah dizertační práce a uplatnit co nejvíce dostupných postupů měření a vyhodnocení ke splnění vytyčených cílů.

Z pohledu systémového přístupu bylo ke svislému soustruhu přistoupeno jako k soustavě, který byl postupně dekomponován na potřebnou rozlišovací úroveň. V průběhu řešení bylo identifikováno několik možností k dosažení vytyčených cílů dizertační práce. Jako velmi vhodná varianta se po konzultacích s odbornými pracovníky z TOSHULIN vybrala varianta s minimální rozlišovací úrovní. Soustava byla rozdělena na dvě subsoustavy. První subsoustava tvoří pouze translační pohyby svislého soustruhu a druhá tvoří jeho rotační osa. K těmto dvěma subsoustavám se dále přistupovalo ke každému zvlášť.

Z rozborů kinematiky svislého soustruhu a definování funkčních požadavků bylo možné přistoupit k požadavkům na sestavení měřicí jednotky a k přístupu měření. Pro translační pohyby bylo využito přístroje Laser Trackeru, u kterého bylo nutné definovat požadavky na optimální pojezd. Zde je myšleno velikost kroků, rychlost snímání, přesnost odečtu, atd. Vyhodnocení naměřených dat prováděl k tomuto účelu navržený algoritmus. Jednotku pro měření rotačních os (desky svislého soustruhu) bylo nutné vyvinout dle požadavků vybraných provozních vlastností stroje. Návrh celé měřicí jednotky byl podroben vývojovému cyklu, přičemž výsledek je prezentován v předložené dizertační práci. Algoritmus pro vyhodnocení naměřených dat byl opět vyvinut z požadavků na danou aplikaci.

Výsledkem je predikce přímosti pro pohyb suportu po příčnici při definované poloze vysunutí smykadla na stroji SKIQ30 (v.č. 1604). Predikování „geometrického“ chování stroje lze provádět na vodorovných a svislých pohybech nástroje vůči desce svislého soustruhu v celém jeho pracovním prostoru. Naměřená

data jsou dále připravena pro zpracování a vyhodnocení chyb kolmosti a rovnoběžnosti soustružených ploch. V práci nebyla řešena problematika soustružení kuželových ploch a obrábění pomocí C-osy svislého soustruhu.

Návrh měřicí jednotky a algoritmu pro vyhodnocování rotačních os je nadále modifikován pro univerzálnější aplikaci a přívětivější manipulaci dle požadavků budoucí obsluhy měřicí aparatury.

## 9 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

V předložené dizertační práci byl představen vývoj nové metodiky měření geometrické přesnosti velkých CNC obráběcích strojů s cílem predikovat vybrané vlastnosti budoucího obrobku.

V kapitole 2 byl představen krátký přehled řešené problematiky v oblasti vědy a techniky. Z provedené analýzy je patrné, že velká část autorů se zabývá popisem chování obráběcích strojů malých rozměrů, a to z pohledu dimenzování a optimalizace vybraných konstrukčních uzlů, predikování dynamického chování a jeho vlivu na obrobek, popisu tepelného ovlivnění nosných struktur, atd. Jen nepatrné množství autorů se věnuje popisu pracovní přesnosti ovlivněné geometrickými chybami obráběcího stroje, přičemž u velkých CNC obráběcích strojů (svislého soustruhu) nebyla nalezena žádná publikace věnovaná řešenému tématu. Z provedených závěrů a požadavků z průmyslu byl dán podnět k návrhu metodiky měření, která popíše „geometrické“ chování svislého soustruhu a z výsledků budou predikovány vybrané vlastnosti obrobku.

Tato metoda měření byla vyvinuta a ověřena na svislém soustruhu SKIQ30, ve firmě TOSHULIN, a.s., který je blíže popsán v kapitole 5 .

V kapitole 6 byl proveden návrh metodiky měření, přičemž první část této kapitoly se věnuje rozboru dané problematiky. Je zde nastíněn přístup výrobce obráběcích strojů ke splnění požadavků zákazníka za použití navrhované metodiky. V kapitole 6.2 byla provedena analýza současné měřicí techniky používané pro identifikaci a kompenzaci příslušných chyb nejen na víceosých CNC obráběcích strojích. V průběhu řešení dizertační práce byly blíže řešeny dva přístupy k popisu chování svislého soustruhu. První přístup byl založen na principu dekompozice celého stroje a sledování přesnosti jednotlivých komponent, popř. konstrukčních celků. Jak bylo v práci uvedeno, tato metoda by byla finančně a časově velmi náročná a proto se od tohoto přístupu opustilo. K druhému řešení se přistupovalo obráceně, sledovat již funkční, plně osazený svislý soustruh s identifikací co možná nejvíce parametrů, popisujících „geometrické“ chování stroje. K vybranému řešení byla provedena v kapitole 6.4.2 rešerše současného stavu vědy a techniky, ze které byly stanoveny další závěry a následné řešení. Svislý soustruh byl rozdělen na dvě funkční části. První část se věnovala lineárním pohybům, tedy pohybům TCP v pracovním prostoru a druhá část byla zaměřena na popis rotační desky svislého soustruhu.

Kapitola 6.4.3 popisuje identifikaci chyb TCP v pracovním prostoru stroje, přičemž bylo využito měřicí zařízení Laserinterferometr (Renishaw) a Laser Tracker (API). Při volbě přístupu k měření se již vycházelo z přístrojového vybavení dostupného na FSI, VUT v Brně a ve firmě TOSHULIN. Inovativním přístupem

k měření svislých soustruhů bylo nasazení Laser Trackeru, o čemž vypovídá i řešená problematika na konferenci v Budapešti, CIRP2011 [48], prezentovaná v pracovní skupině „Precision Engineering and Metrology“. V této pracovní skupině byly řešeny možnosti využití Trackerů a Tracerů pro sledování chyb na velkých CNC obráběcích strojích. Aplikací Laser Trackeru (API) na menších CNC obráběcích strojích s úkolem mapovat geometrické chyby v pracovním prostoru obráběcího stroje se zabýval diplomant Josef Knobloch. Výsledky z řešení jsou doloženy v příloze 16.8. Na měření svislého soustruhu byla použita strategie z normy VDI/DGQ 3441, která je běžně ve firmě TOSHULIN aplikována. Do strategie snímání dat byly zaneseny faktory „časová náročnost“ a „maximální počet bodů“. Zvolený cyklus měření byl po konzultacích v TOSHULIN shledán jako dostatečný v rámci vývoje metodiky měření a pro následné aplikace v průmyslových úlohách by musely proběhnout další potřebné zkoušky. Surové hodnoty ze systému Laser Trackeru byly zpracovány převážně manuálně a následně zpracovány v jiném softwaru. Opět pro jednoduchou aplikaci při komerčním nasazení by bylo nutné vyvinout software pro komunikaci mezi Spatial Analyzer (Tracker) a softwarem Matlab.

Pro predikování chyb svislého soustruhu od pohybu TCP je věnován zbytek kapitoly 6.4.3. Průběhy naměřených chyb, které jsou v práci zobrazeny, byly dále podrobeny statistické analýze k vyhodnocení chování těchto posuvů. Výsledné hodnoty pro vybrané polohy a posuvy TCP v pracovním prostoru byly zaneseny do výsledného vztahu pro stanovení celkové odchylky nástroje od obrobku.

V následující kapitole 6.4.4 byl sestaven návrh na měření druhé řešené části svislého soustruhu, rotační desky. V prvním bodě byly definovány požadavky na hledané parametry rotačních desek, které vychází z předchozích řešení. Z pracovních podmínek svislých soustruhů byly společně s odbornými zaměstnanci fy. TOSHULIN vyspecifikovány provozní podmínky svislého soustruhu pro testování. Sestavené schéma pro zkoušení přesnosti chodu rotační desky odpovídá požadavkům na budoucí obrobek a pro detailnější specifikaci testovacích podmínek je zapotřebí vycházet ze získaných zkušeností následných provedených zkoušek. Pro stanovené podmínky a způsob měření byly odvozeny algoritmy pro definování hledaných chyb rotační desky. Současně probíhala volba vhodné měřicí aparatury a návrh měřicí jednotky určené pro svislé soustruhy z produkce fy. TOSHULIN. Jednotka pro měření rotačních desek svislých soustruhů byla navržena pro vývoj metodiky měření a pro komerční použití by musela být podrobena zkouškám ČIA. Měřicí jednotka byla podrobena testování na frézovacím stroji, na kterém byly prováděny první reálné zkoušky. Následovalo zpracování algoritmů pro identifikaci jednotlivých hledaných parametrů v softwaru Matlab. Z provedených měření a získaných informací o chování rotačních desek byl předložen návrh na modifikaci měřicího zařízení za účelem získání detailnějších informací o jejich chování. Z výsledků byly identifikovány chyby ovlivňující výslednou vzájemnou polohu



mezi obrobkem a TCP, přičemž chyba TCP zde nebyla uvažována. Výsledné průběhy vybraných posuvů byly zobrazeny v grafech pro různé zkušební podmínky. V následující kapitole 6.4.5 byla definována celková odchylka vzniklá mezi TCP a rotační deskou. Výsledné chyby byly vyneseny do příslušných grafů. Posledním krokem byla provedena predikce vybraných vlastností budoucího obrobku, který by byl obráběn za testovaných podmínek.

V poslední části kapitoly 6 byla řešena problematika modifikace metodiky měření, která vzešla ze získaných informací a zkušeností v průběhu řešení dizertační práce. Pro modifikaci měřicí jednotky byly představeny konkrétní body, které by měly pozitivní vliv na výslednou přesnost měření, minimalizaci časové náročnosti měření a možnosti podrobněji pospat průběhy chyb vzniklých na rotační desce. Z výsledného řešení je dán základ pro stavbu diagnostického zařízení pro rychlou kontrolu rotačních desek větších rozměrů. Dále se naskytla myšlenka využít získaných informací o chování rotační desky pro aktivní kompenzaci odchylky mezi TCP a obrobkem.

Řešená problematika dizertační práce zabývající se geometrickou přesností a návrhem měření velkých CNC obráběcích strojů je v současné době velice aktuální téma, se kterým je počítáno, jako s jedním z důležitých bodů organizace CIRP plánovaných na následující roky. Prezentovaný dokument autorem Uriarte [49] na konferenci CIRP 2011, Budapešť v pracovní skupině „machines“ byl zaměřen právě na velké CNC obráběcí stroje (Keynote proposal), přičemž jedním z hlavních plánovaných řešených bodů je popis geometrické přesnosti těchto strojů a jejich kalibrace.

Současně na konferenci CIRP2011 v Budapešti byla založena pracovní skupina „Group of Laser Tracer User in STC-P: Collaboration, Technical exchanges, ...“ [50], do které by se rád autor v následujícím roce 2012 připojil.

## 10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1]. DU, Zhenchung; ZHANG, Shujie; HONG, Maisheng. Development of a multi-step measuring method for motion accuracy of NC machine tools based on cross grid encoder. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. 2010, 50, s. 270-280. ISSN 0890-6955.
- [2]. RAMESH, R; MANNAN, M; POO, A. Error compensation in machine tools : Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* . 2000, 40, s. 1235-1256. ISSN 0890-6955.
- [3]. PROKOP, Mojmir. *Výrobní stroje I.* první. Brno : Rektorát VUT v Brně, 1985. 166 s. ISBN 55-589-85.
- [4]. OKAFOR, A; ERTEKIN, Yalcin . Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000, 40, s. 1199-1213. ISSN 0890-6955.
- [5]. SRIVASTAVA, A; VELDHUIS, S; ELBESTAWLT, M. Modeling geometric and thermal errors in a five axis cnc machine tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1995, 35, s. 1321-1337. ISSN 0890-6955.
- [6]. LEE, Jae Ha; LIU, Yu; YANG, Seung-Han. Accuracy improvement of miniaturized machine tool: Geometric error modeling and compensation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, 46, s. 1508-1516. ISSN 0890-6955.
- [7]. LEI, W.T; HSU, Y.Y. Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through realtime error compensation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003, 43, s. 871-877. ISSN 0890-6955.
- [8]. IBARAKI, Soichi, et al. Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools. *Precision Engineering*. 2010, 34, s. 387-398. ISSN 0141-6359.
- [9]. UDDIN, M, et al. Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors. *Precision Engineering*. 2009, 33, s. 194-201. ISSN 0141-6359.
- [10]. BARAKAT, N.A; ELBESTAWI, M.A; SPENCE, A.D. Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000, 40, s. 833-850. ISSN 0890-6955.

- 
- [11]. KONG, L.B, et al. A kinematics and experimental analysis of form error compensation in ultra-precision machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2008, 48, s. 1408-1419. ISSN 0890-6955.
- [12]. JANÍČEK, Přemysl . *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky hledání souvislostí : Učební texty I*. Brno : CERM Brno, 2007. 682 s. ISBN 978-80-7204-555-6.
- [13]. MEHRABI, M.G, et al. Improving machinig accuracy in precision line boring. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2002, 13, s. 379-389. ISSN 0956-5515.
- [14]. SUH, Suk-Hwan; LEE, Eung-Suk; JUNG, Se-Yong. Error Modelling and Measurement for the Rotary Table of Five-axis Machine Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1998, 14, s. 656-663. ISSN 1433-3015.
- [15]. AHN, Kyoung Gee; CHO, Dong Woo. Proposition for a Volumetric Error Model Considering Backlash in Machine Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1999, 15, s. 554-561. ISSN 1433-3015.
- [16]. DE AQUINO SILVA, Joao Bosco, et al. Approach for uncertainty analysis and error evaluation of four-axis co-ordinate measuring machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008, 17, s. 1552. ISSN 0141-6359.
- [17]. YANG, S.H, et al. Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2004, 23, s. 495-500. ISSN 1433-3015.
- [18]. RAKSIRI, Chana; PARNICHKUN, Manukid. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004, 44, s. 1283-1291. ISSN 0890-6955.
- [19]. LEI, W.T; SUNG, M.P. NURBS-based fast geometric error compensation for CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2008, 48, s. 307-319. ISSN 0890-6955.
- [20]. AHN, Kyoung-Gee; MIN, Byung-Kwon; PASEK, Zbigniew J. Modeling and compensation of geometric errors in simultaneous cutting using a multi-spindle machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, 29, s. 929-939. ISSN 1433-3015.
- [21]. CHOI, J.-P; LEE, S.-J; KWON, H.-D. Roundness Error Prediction with a Volumetric Error Model Including Spindle Error Motions of a Machine Tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003, 21, s. 923-928. ISSN 1433-3015.

- 
- [22]. DEMEČ, Peter. *Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie*. Košice : Vienaľa Košice, 2001. 140 s. ISBN 80-7099-620-X.
- [23]. AMRICHOVÁ, Henrieta. *Matematické modelovanie presnosti obrábacích strojov*. Košice, 2008. 154 s. Dizertační práce. Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra výrobnjej techniky a robotiky. Vedoucí práce prof. Ing. Peter Demeč, CSc.
- [24]. BRINGMANN, B; KNAPP, W. Machine tool calibration: Geometric test uncertainty depends on machine tool performance. *Precision Engineering*. 2009, 33, s. 524-529. ISSN 0141-6359.
- [25]. CHENT, Jenq-Shyong. Computer-aided accuracy enhancement for multi-axix cnc machine tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1995, 35, s. 593-605. ISSN 0890-6955.
- [26]. PAHK, Huei Jae; KIM, Young Sam; MOON, Joon Hee. A new technique for volumetric error assessment of cnc machine tools incorporating ball bar measurement and 3D volumetric error model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1997, 37, s. 1583-1596. ISSN 0890-6955.
- [27]. JEONG, Gi-Bum; KIM, Dong Hwan; JANG, Dong Young. Real time monitoring and diagnosis system development in turning through measuring a roundness error based on three-point method. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2005, 45, s. 1494-1503. ISSN 0890-6955.
- [28]. MAREK, Jiří. *Systémový přístup při návrhu nové 3D jednotky*. VUT v Brně, 1996. 128 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Kolíbal, Csc.
- [29]. Interní dokumenty fy. TOSHULIN
- [30]. ČSN ISO 230-2. *Základní zkoušky obráběcích strojů : Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Praha : Český normalizační institut, 1999. 17 s.
- [31]. VDI/DGQ 3441. *Statistische Pruefung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen : Grundlagen*. Dusseldorf : Beuth Verlag GmbH, 1977. 21 s.
- [32]. Interní dokumenty fy. API
- [33]. *Wikipedie* [online]. 26.11.2010 [cit. 2011-07-08]. Predikce. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Predikce>>.
- [34]. ZIRN, Oliver. *Machine tool analysis : modelling, simulation and control of machine tool manipulators* . Zurich , 2008. 280 s. Habilitační práce. ETH Zurich, Institute of Machine Tools and Manufacturing . Dostupné z WWW: <[152](http://e-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

- collection.library.ethz.ch/eserv/eth:41862/eth-41862-01.pdf#search=%22%28keywords\_en:TELEMANIPULATORS%29%22>.
- [35]. ČSN ISO 1101. *Geometrické specifikace výrobků (GPS) : Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. [s.l.] : Český normalizační institut, 2006. 20 s.
- [36]. *Jenoptik* [online]. 2005 [cit. 2011-07-12]. Úchylky tvaru a polohy dle DIN ISO. Dostupné z WWW: <[http://www.hommel-etamic.cz/cz/techinfo\\_02.htm](http://www.hommel-etamic.cz/cz/techinfo_02.htm)>.
- [37]. SVOBODA, Ondřej. Kontrola geometrické přesnosti pětiosých strojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 16. března 2011, 2011, 3, [cit. 2011-07-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/kontrola-geometricke-presnosti-petiosych-stroju>>. ISSN 1212-2572.
- [38]. *IBSE* [online]. 2011 [cit. 2011-07-12]. Machine tool calibration. Dostupné z WWW:<[http://www.ibspe.com/ibs\\_precision\\_engineering\\_uk/pdfs/MachineToolCalibration-20p.pdf](http://www.ibspe.com/ibs_precision_engineering_uk/pdfs/MachineToolCalibration-20p.pdf)>.
- [39]. *Renishaw* [online]. 2011 [cit. 2011-07-12]. AxiSet Check-Uú. Dostupné z WWW:<<http://www.renishaw.cz/cs/axiset-check-up--11353#ElementMediaList27057>>.
- [40]. *Etalon AG* [online]. 2011 [cit. 2011-07-13]. Home. Dostupné z WWW: <<http://www.etalon-ag.com/>>.
- [41]. ANAND, Raj B. *Static error modeling in turning operation and its effect on form errors*. Cincinnati, US, 2008. 74 s. Dizertační práce. Univerity of Cincinnati..
- [42]. WECK, Manfred; BRECHER, Christian. *Werkzeugmaschinen 5 : Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. Vyd. 7. Berlin : Springer-Verlag, 2006. 469 s. ISBN 978-3-540-22505-8.
- [43]. MAYER, Rene; PHAN, Anh-Vu; CLOUTIER, Guy. Prediction of diameter errors in a bar turning: a computationally effective model. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2000, 24, [cit. 2011-07-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- [44]. [Http://www.bkvibro.com](http://www.bkvibro.com) [online]. 28.1.2003 [cit. 2011-08-01]. Integrated displacement sensors. Dostupné z WWW: <<http://www.bkvibro.com/fileadmin/mediapool/Internet/PDF-Files/Documentation/Sensors/IN/in-08xdef.pdf>>.
- [45]. [Www.micro-epsilon.cz](http://www.micro-epsilon.cz) [online]. 2011 [cit. 2011-08-01]. Snimače pro měření vzdálenosti a polohy. Dostupné z WWW: <<http://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/index.html>>.

- [46]. Wwww.ges.cz [online]. 2011 [cit. 2011-08-02]. CNY70. Dostupné z WWW: <<http://www.ges.cz/sheets/c/cny70.pdf>>.
- [47]. Český institut pro akreditaci, o.p.s. EA 4/02 : Vyjadřování nejistot měření při kalibracích. *Dokumenty EA : EA - Evropská spolupráce pro akreditaci* [online]. 2001, 01\_08-P001-20061023, [cit. 2011-10-21]. Dostupný z WWW: <[http://www.cai.cz/files/01\\_08-P001%20EA%2004\\_02\\_20061023.pdf](http://www.cai.cz/files/01_08-P001%20EA%2004_02_20061023.pdf)>.
- [48]. YAGUE-FABRA, José, et al. Verification of large machine-tools using laser tracker and multilateration techniques. *61st CIRP General Assembly* [online]. 2011, 61, [cit. 2011-10-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.cirp.net/images/cirpfichiers/privatefiles/STC/STCP/2011/Aug11/stc\\_p\\_annex\\_5.5\\_aug.11.pdf](http://www.cirp.net/images/cirpfichiers/privatefiles/STC/STCP/2011/Aug11/stc_p_annex_5.5_aug.11.pdf)>.
- [49]. URIARTE, L, et al. Machine Tools for Large Parts : On the concepts, design and construction of special purpose machine tools to support processing of large components. *61st CIRP General Assembly* [online]. 2011, 61, [cit. 2011-10-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.cirp.net/images/cirpfichiers/privatefiles/STC/STCM/2011/Aug11/stc\\_m\\_annex05\\_aug.11.pdf](http://www.cirp.net/images/cirpfichiers/privatefiles/STC/STCM/2011/Aug11/stc_m_annex05_aug.11.pdf)>.
- [50]. LINARES, J.M. Group of Laser Tracer Using in STC-P : Collaboration, Technica exchanges, .... *61st CIRP General Assembly* [online]. 2011, 61, [cit. 2011-10-24]. Dostupný z WWW: <[http://www.cirp.net/images/cirpfichiers/privatefiles/STC/STCP/2011/Aug11/stc\\_p\\_annex\\_5.9\\_aug.11.pdf](http://www.cirp.net/images/cirpfichiers/privatefiles/STC/STCP/2011/Aug11/stc_p_annex_5.9_aug.11.pdf)>.
- [51]. LUDVÍK, Vladimír. Nejistoty měření, přesnost měření, správnost měření a otázky spojené s prohlášením o shodě s technickými specifikacemi. In *Sborníky technické harmonizace* [online]. Praha : ., 2005 [cit. 2011-11-16]. Dostupné z WWW: <[http://www.unmz.cz/sborniky\\_th/index.htm](http://www.unmz.cz/sborniky_th/index.htm)>.
- [52]. ČSN ISO 230-1. *Základy zkoušek obráběcích strojů : Část 1: Geometrická přesnost strojů pracující bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha : Český normalizační institut, 1997. 92 s.
- [53]. DIN ISO 230-2. *Prüfregeln für Werkzeugmaschinen : Teil 2: Bestimmung der Positionsunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen*. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung, 2000. 10 s.
- [54]. DIN ISO 230-1. *Prüfregeln für Werkzeugmaschinen : Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbearbeitungen arbeiten*. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung, 1999. 53 s.
- [55]. ONDRÁČEK, E; SLAVÍK, J. *Základní pojmy z mechaniky*. Brno : Skriptum VUT Brno, 1987.

- 
- [56]. ONDRÁČEK, E; JANÍČEK, P. *Výpočtové modely v technické praxi*. Praha : SNTL, 1990.
- [57]. JANÍČEK, P. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky hledání souvislostí*. Vysoké učení technické v Brně : VUTIUM, 2007. 1230 s. ISBN 978-80-7204-55-6.
- [58]. BLECHA, Petr. *Využití moderních metod řízení a zabezpečování jakosti při konstrukci obráběcích center*. Brno, 1999. 129 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Vavřík, Csc.
- [59]. JANÍČEK, P; ONDRÁČEK, E. *Řešení problémů modelováním : Téměř nic o téměř všem*. 1. Brno : PC-DIR Real, 1998. 335 s. ISBN 80-214-1233-X.
- [60]. HOSNEDL, S. Systémové navrhování technických produktů KKS/ZKM . In *Podklady k přednáškám*. ZČU Plzeň : Katedra konstruování strojů, 2001.
- [61]. HUBKA, V. *Konstrukční nauka : Obecný model postupu při konstruování* . Hosnedl. 2. přepracované. Zurich : Heurista, 1995. 118 s. ISBN 80-90-1135-0-8.

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

|       |                                                                   |
|-------|-------------------------------------------------------------------|
| 3D    | Třírozměrná dimenze                                               |
| ADM   | Absolute distanc meter                                            |
| CMM   | Coordinate measuring machines                                     |
| CNC   | Computer Numeric Control                                          |
| ČIA   | Český institut pro akreditaci                                     |
| ČSN   | Česká státní norma                                                |
| DBB   | Double Ball Bar – Měřicí systém pro diagnostiku obráběcích strojů |
| E     | Elektrická energie                                                |
| F     | Přenos síly                                                       |
| GUM   | Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement             |
| GPS   | Globální polohový systém                                          |
| HeNe  | Helium, Neon Laser                                                |
| HTM   | Homogenní transformační matice                                    |
| I     | Informace                                                         |
| IBSPE | IBS Precision engineering                                         |
| IFM   | Interferometr measuring                                           |
| ISO   | Mezinárodní organizace pro normalizaci                            |
| K     | Kapalina                                                          |
| KGM   | Měřicí systém pro kontrolu a testování obráběcích strojů          |
| Mk    | Přenos krouticího momentu                                         |
| OS    | Obráběcí stroj                                                    |



|      |                                                                  |
|------|------------------------------------------------------------------|
| PO   | Polohová vazba                                                   |
| PS   | Pasivní polohová vazba                                           |
| PWT  | Powerturn                                                        |
| TCP  | Tool center point                                                |
| TeO  | Technický objekt                                                 |
| V.č. | Výrobní číslo                                                    |
| VIM  | International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology |
| VDI  | Sdružení německých inženýrů                                      |
| VS   | Výrobní stroj                                                    |

## 12 VLASTNÍ PUBLIKACE

- [1]. HOLUB, M; SÝKORA, J. Experimental model for measurement of linear axes of machine tools. In KATALINIC, Branko. *21st International DAAAM Symposium : článek ve sborníku akce: The 21st DAAAM World Symposium 2010*. Vienna, Austria : DAAAM International Vienna, 2010. s. 923-925. ISBN 978-3-901509-73-5.
- [2]. MICHALÍČEK, M; HOLUB, M. Compensation of Geometric Accuracy and Working Uncertainty of Vertical lathes. In *Recent advances in Mechatronics 2008 - 2009 : článek ve sborníku akce: Mechatronics 2009*. Berlin : Springer-Verlag, 2009. s. 383-388. ISBN 978-3-642-05021-3.
- [3]. HOLUB, M; MICHALÍČEK, M. Metodické stanovení parametrů ovlivňující výrobní přesnost obráběcích strojů. In 2nd Ph.D. Students Workshop. VUT v Brně : ÚVSSR, 2008. s. 3.
- [4]. HOLUB, Michal. Analýza geometrické přesnosti a přesnosti polohování karuselu. In *3rd Ph.D. Students Workshop*. VUT v Brně : UVSSR, 2009. s. 5.
- [5]. HOLUB, Michal, et al. Identification of geometric errors of rotatory axes in machine tools. In JABLONSKI, Ryszard; BŘEZINA, Tomas. *Mechatronics : Recent technological and scientific advances*. Berlin : Springer-Verlag, 2011. s. 213-217. ISBN 978-3-642-23243-5.
- [6]. OPL, Miroslav, et al. DELTA - Robot with parallel kinematics. In JABLONSKI, Ryszard; BŘEZINA, Tomas. *Mechatronics : Recent technological and scientific advances*. Berlin : Springer-Verlag, 2011. s. 445-452. ISBN 978-3-642-23243-5.
- [7]. HOLUB, Michal, et al. DELTA - Robot with parallel kinematics. In KOLÍBAL, Zdeněk. *MM Science Journal : 20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*. Brno : MM publishing, 2011. s. 186-189. ISSN 1803-1269.

## 13 TVŮRČÍ AKTIVITY A PROJEKTY

- [1]. VAVŘÍK, I.; HOLUB, M.; BLECHA, P.; BRADÁČ, F.; KARPÍŠEK, Z.: Technologie zpracování dat CMM; *Vývoj metodiky a etalonů na zkoušení přesnosti souřadnicových měřicích strojů s optickým snímacím systémem a optických souřadnicových měřicích strojů. Projekt číslo 4.2 PT 01/ 013. ÚVSSR.* (ověřená technologie).
- [2]. HOLUB, M.; SÝKORA, J.; BRADÁČ, F.: Diagnostika ložisek, OCTAVIS; *Zkušební zařízení pro diagnostiku ložisek systémem OCTAVIS.* A1/ 1224, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 61669 BRNO. (funkční vzorek) [http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=713](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=713).
- [3]. HOLUB, M.; OPL, M.; PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.: TepSnim; *Univerzální software pro měření teplotními senzory.* ÚVSSR, FSI VUT, Technická 2, 616 69, Brno. (software) [http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=1008](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=1008).
- [4]. HOLUB, M.; PAVLÍK, J.; OPL, M.: KalKlav; *Kalibrační software akcelerometru pro modální analýzu.* A1/ 1229, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 61669 BRNO. (software).
- [5]. HOLUB, M.; BRADÁČ, F.; OPL, M.; PAVLÍK, J.: GeomM; *Sběr a zpracování dat z měření geometrických odchylek.* VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 61669 BRNO. (software).
- [6]. HOLUB, M.; PAVLÍK, J.; OPL, M.; BRADÁČ, F.: GeomRot; *Zařízení pro měření geometrických chyb rotačních stolů.* VUT v Brně, FSI, Technická 2, 61669, Brno, Místnost A1/ 1224. (funkční vzorek) [http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=1022](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=1022).
- [7]. PAVLÍK, J.; OPL, M.; HOLUB, M.: kal\_ akc; *Stand pro kalibraci akcelerometrů.* VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 61669 BRNO. (funkční vzorek) [http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=1019](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=1019).
- [8]. BRADÁČ, F.; HOLUB, M.; PAVLÍK, J.; OPL, M.; NOVOTNÝ, T.; TŮMA, Z.: DeltaRobot; *Manipulátor na bázi paralelní kinematiky - delta robot s třemi osami.* VUT FSI, Technická 2, B1/ 305. (funkční vzorek). [http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=991](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=991).
- [9]. Návrh modulárního experimentálního standu pro analýzu přesnosti polohování posuvových os výrobních strojů, zahájení: 01.01.2010, ukončení: 31. 12. 2010. *Projekt číslo FSI-J-10-39.*

- 
- [10]. Výzkum a vývoj (VaV) nekonvenčních manipulátorů a robotů (NMaR], zahájení: 01. 01. 2010, ukončení: 31. 12. 2010. *Projekt číslo FSI-S-10-27*.
- [11]. Enviromentální a bezpečnostní aspekty vývoje, výroby a provozu strojů, zahájení: 01. 01. 2011, ukončení: 31. 12. 2013. *Projekt číslo FSI-S-11-5*.
- [12]. Synchronizace řízení běhu více DC motorů, zahájení: 01. 01. 2011, ukončení: 31. 12. 2011. *Projekt číslo FSI-J-11-39*.
- [13]. Návrh experimentálního standu pro analýzu energetické náročnosti posuvových os výrobních strojů, zahájení: 01. 01. 2011, ukončení: 31. 12. 2011. *Projekt číslo FSI-J-11-16*.
- [14]. Ecodesign ve stavbě obráběcích strojů, zahájení: 2011, ukončení: 2013. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. *Projekt číslo FR-TI3/655*.
- [15]. Inovační voucher JMK – Měření vlastností kompozitních materiálů, Foller s.r.o., ukončení 31. 5. 2011.
- [16]. Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost (OP VK), CZ.1.07/2.2.00/07.0406 - Zavedení problémově orientovaného vzdělávání do studijních plánů strojírenství, zahájení: 2009, ukončení: 2012.
- [17]. Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost (OP VK), CZ.1.07/2.3.00/09.0162 - Znalosti a dovednosti v mechatronice – transfer inovací do praxe, zahájení: 2009, ukončení: 2012.
- [18]. NETME centre - nové technologie pro strojírenství (OP VaVpI), CZ.1.05/2.1.00/01.0002, zahájení: 2009, ukončení: 2013.
- [19]. Měření obráběcích strojů. Zprávy neveřejné (02/13350/13, 04/13350/11, 02/13350/11, 05/13350/11, 03/13350/11, 8/13350/10, 16/13350/10).

## 14 OSTATNÍ ČINNOST

Vedení diplomových a bakalářských prací

- [1] ČEP, David. *Rešerše metod zjišťování geometrických chyb obráběcích strojů*. Brno, 2009. 58 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [2] ŠVÁČEK, Karel. *Deskripce vedení u obráběcích strojů*. Brno, 2009. 36 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [3] SEDLÁK, Pavel. *Deskripce ložisek pro rotační pohyb*. Brno, 2009. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [4] LÁBUS, Miroslav. *Návrh polymerbetonového rámu obráběcího stroje*. Brno, 2010. 117 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [5] TKADLEC, Dušan. *Návrh dvouosé automatické vidlicové frézovací hlavy osazené elektrovřetem s aplikací pohonů Harmonic-Drive*. Brno, 2010. 90 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [6] UHLÍŘ, Jaroslav. *Návrh dvouosé automatické univerzální frézovací hlavy osazené elektrovřetenem s aplikací pohonů Harmonic-Drive*. Brno, 2010. 96 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [7] ZVADA, Pavel. *Konstrukční návrh manipulátoru motoru*. Brno, 2010. 63 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [8] PAŘÍK, Zdeněk. *Měření a analýza vibrací systémem OCTAVIS*. Brno, 2011. 88 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [9] STARÝ, Radek. *Konstrukce osového řešení vřeteníku, převodovky a hlavního pohonu*. Brno, 2011. 61 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [10] ČUNEK, Jakub. *Kompozitní materiály ve stavbě obráběcího stroje*. Brno, 2011. 33 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.

- 
- [11] KNOBLOCH, Josef. *Mapování geometrických chyb v pracovním prostoru obráběcího stroje*. Brno, 2011. 80 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [12] ŠTOL, Michal. *Konstruktivní návrh 3-osého manipulátoru*. Brno, 2011. 75 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [13] HON, Pavel. *Trískové hospodárství obráběcího stroje*. Brno, 2011. 57 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [14] IMRICH, David. *Návrh posuvové skříně osy X*. Brno, 2011. 90 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [15] COUFAL, Jiří. *Konstrukce manipulátoru s PKS pro velmi malé součásti*. Brno, 2011. 111 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Holub.
- [16] BOSÁK, Daniel. *Konstrukční návrh přípravku pro odjehlování ozubených kol*. VUT v Brně, Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Michal Holub. - Rozpracováno
- [17] FRYČOVÁ, Martina. *Konstrukční návrh stroje pro řezání laserem a plasmou*. Brno, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Michal Holub. – Rozpracováno
- [18] SLAVÍČEK, Josef. *Měření vřeten obráběcích strojů pomocí bezkontaktních snímačů*. Brno, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Michal Holub. – Rozpracováno
- [19] KUDLÁČEK, Miroslav. *Návrh suportu brusky*. Brno, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Michal Holub. – Rozpracováno
- [20] BÍLEK, Vít. *Trískové hospodárství obráběcího stroje*. VUT v Brně, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Michal Holub. Rozpracováno

## 15 SEZNAM PŘÍLOH

- PŘÍLOHA ČÍSLO 1 – TERMINOLOGIE – PŘESNOST NAJETÍ DO PLOHY
- PŘÍLOHA ČÍSLO 2 – PŘESNOST CHODU ROTAČNÍ DESKY
- PŘÍLOHA ČÍSLO 3 – PŘESNOST KONSTRUKČNÍCH UZLŮ NA TCP
- PŘÍLOHA ČÍSLO 4 – VÝSLEDKY MĚŘENÍ LINEÁRNÍCH OS
- PŘÍLOHA ČÍSLO 5 – HODNOTY TA BULKY PRO STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT
- PŘÍLOHA ČÍSLO 6 – CHOVÁNÍ ODCHYLKY DELTA57
- PŘÍLOHA ČÍSLO 7 – DRŽÁK IN\_081
- PŘÍLOHA ČÍSLO 8 – VÝSLEDKY DIPLOMOVÉ PRÁCE
- PŘÍLOHA ČÍSLO 9 – DOKUMENTACE Z MĚŘENÍ SVISLÉHO SOUSTRUHU
- PŘÍLOHA ČÍSLO 10 – ŽIVOTOPIS

## 16 PŘÍLOHY

### 16.1 PŘÍLOHA ČÍSLO 1 - TERMINOLOGIE – PŘESNOST NAJETÍ DO POLOHY

#### 16.1.1 Terminologie – Přesnost najetí do polohy

Kapitola terminologie zde byla zařazena na základě doporučení zkušební komise SDZ. Má zde být řešena problematika pojmů a definic vyskytujících se u přejímacích zkoušek obráběcích strojů. Důvodem je hojné využívání směrnice VDI\DGQ 3441 výrobci obráběcích strojů a její překlad do českého jazyka, kde používaná terminologie se dostává do rozporu s normou ČSN ISO 230-2.

Cílem této části je normalizovat názvosloví pro vyhodnocování měření obráběcích strojů, kde vznikl rozpor mezi pojmy přejatými ze směrnice VDI\DGQ 3441 používané především ve výrobě a kontrole obráběcích strojů a pojmům definovaných v normě ČSN ISO 230-2 (nejistota polohování, přesnost polohování).

#### 16.1.2 Dle norem ČSN ISO 230-1, 2, DIN ISO 230-1,2

V této části budou popsány definice vybraných pojmů, které budou dále používány při zpracování dizertační práce z norem:

- ČSN ISO 230-1 (Základy zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracující bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění).
- ČSN ISO 230-2 (Základy zkoušek obráběcích strojů – Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách).
- DIN ISO 230-1 (Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbearbeitungen arbeiten).
- DIN ISO 230-2 (Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 2: Bestimmung der Positionsunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen).

Normy ČSN ISO 230-1 a DIN ISO 230-1 budou sloužit pro definování parametrů z norem ČSN ISO 230-2 a DIN ISO 230-2. V následujících krocích budou tedy podrobeny rozboru poslední dvě uvedené normy.

- Názvy norem



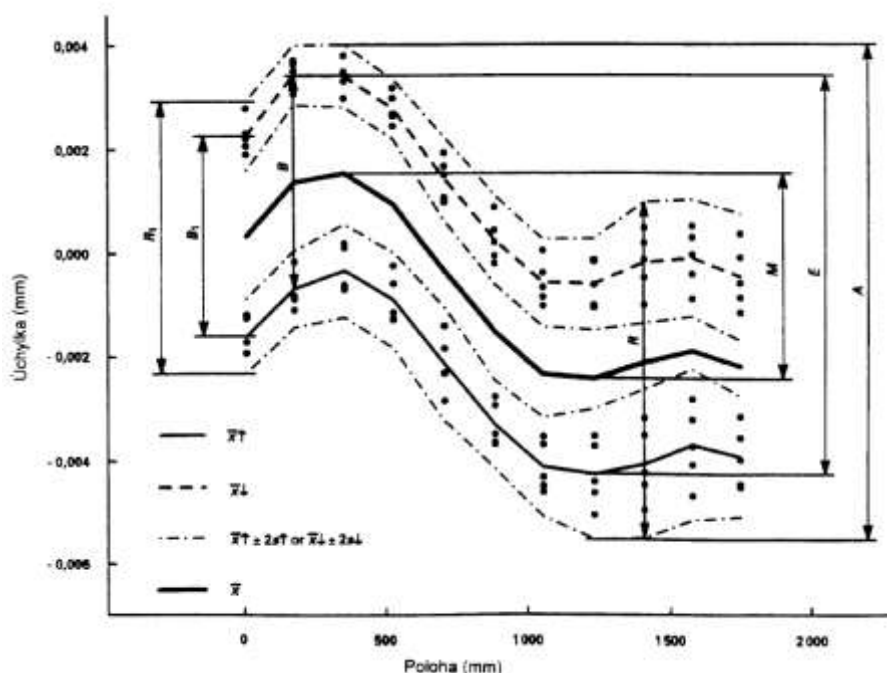
(ČSN) Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. (DIN) Bestimmung der Positionsunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen.

- Obsah norem

Obsahy obou norem jsou totožně koncipovány (Úvod, předmět normy, definice a značky, zkušební podmínky, zkušební program, vyhodnocení výsledků, podmínky, které by měli být dohodnuty mezi dodavatelem/výrobce a uživatelem, vyjádření výsledků), z těchto částí budou porovnávány kapitoly „definice a značky“ a „vyjádření výsledků“, které umožní správnou interpretaci pojmů.

- Zpracování

Jako postup pro porovnání se bude vycházet z obr. 1 [30, s. 14], který slouží ke zpracování a vyhodnocení příslušného měření.



Obr. 126 Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [30].

V tab. 1 jsou dále vidět označení jednotlivých veličin a porovnání českého a německého názvosloví. U značky A je vidět že český název zní „Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose“ a německý „Zweiseitige Positionierungsunsicherheit einer Achse“, což lze volně přeložit jako „oboustranná nejistota polohování osy“.

Různorodost vyložení této veličiny A bylo podmětem zanesení kapitoly terminologie do úvodu dizertační práce zabývající se touto problematikou.

**Tab. 12 Porovnání terminologie ČSN ISO 230-1 a DIN ISO 230-2 [30, 5].**

| <b>Značka</b> | <b>ČSN ISO 230-2</b>                                              | <b>DIN ISO 230-2</b>                                                                | <b>Odlišnost</b> |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>A</b>      | Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose                       | Zweiseitige Positionierungsicherheit einer Achse                                    | <b>ANO</b>       |
| <b>E</b>      | Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose                   | Zweiseitige systematische Positionsabweichung einer Achse                           | NE               |
| <b>M</b>      | Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose                       | Spannweite der gemittelten zweiseitigen Positionsabweichung einer Achse             | NE               |
| <b>R</b>      | Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose                 | Zweiseitige Wiederholpräzision der Positionierung einer Achse                       | NE               |
| <b>B</b>      | Necitlivost v ose                                                 | Umkehrspanne einer Achse                                                            | NE               |
| <b>s</b>      | Odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v poloze | Schätzwert der einseitige Standardunsicherheit der Positionierung an einer Position | NE               |
| <b>x</b>      | Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze                    | Gemittelte zweiseitige Positionsabweichung an einer Position                        | NE               |

- **Závěr**

Z kapitoly 14.1.2 lze konstatovat, že normy ISO 230-2 v podání ČSN a DIN jsou totožné kromě jednoho bodu (z tabulky 1 pod značkou A), kde může být pojem špatně interpretován a to volným překladem z německého jazyka do českého jazyka.

### 16.1.3 Dle směrnice VDI/DGQ 3441

Názvosloví dle směrnice VDI/DGQ 3441 (Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen, Grundlagen).

- Název směrnice a norem

(VDI) Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen, Grundlagen.

(DIN) Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbearbeitungen arbeiten.

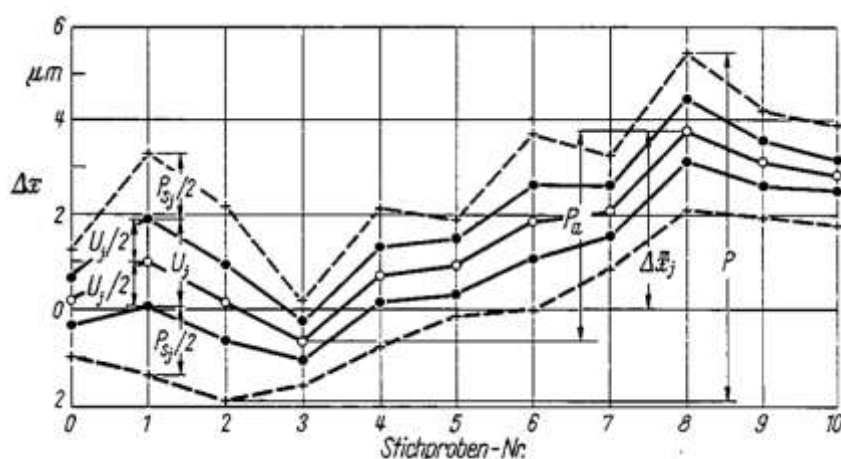
(ČSN) Základy zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění

- Obsah směrnice a norem

Směrnice VDI/DGQ 3441 je rozčleněna podobně, jako předchozí normy s rozdílem, že zde nalezneme zkoušky pracovní přesnosti, které jsou též popsány v normách ČSN ISO 230-1 a DIN ISO 230-1.

- Zpracování

Zde budou ke srovnání a posouzení pojmů využity všechny výše uvedené normy [30, 31, 52, 53, 54]. Opět se bude vycházet z obrázku pro vyhodnocení zkoušky dle VDI/DGQ 3441, které je zobrazeno na obr. 2.



Obr. 127 Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy [31].

Tab. 13 Definice dle směrnice VDI/DGQ 3441 [31].

| Zn. VDI              | Zn. ISO              | VDI/DGQ 3441                                                                                                            | DIN ISO 230-2                                                                                                                                                                    | Odlišnost |
|----------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>P</b>             | <b>A</b>             | Positionsunsicherheit<br>$P = [\bar{x}_{ij} + 1/2 (U_j - P_{sj})]_{\max} - [\bar{x}_{ij} - 1/2 (U_j - P_{sj})]_{\min}$  | Zweiseitige Positionierungsunsicherheit einer Achse<br>$A = \max[\bar{x}_{i,p} + 2s_{i,p}; \bar{x}_{i,n} + 2s_{i,n}] - \min[\bar{x}_{i,p} - 2s_{i,p}; \bar{x}_{i,n} - 2s_{i,n}]$ | NE        |
| <b>P<sub>a</sub></b> | <b>M</b>             | Positionsabweichung<br>$P_a =  \bar{x}_{j,\max} - \bar{x}_{j,\min} $                                                    | Spannweite der gemittelten zweiseitigen Positionsabweichung einer Achse<br>$M = \max[\bar{x}_{i,p}] - \max[\bar{x}_{i,n}]$                                                       | NE        |
| <b>P<sub>s</sub></b> | <b>R<sub>i</sub></b> | Positionsstreuung<br>$P_s = 6 \cdot \bar{s}_j$                                                                          | Zweiseitige Wiederholpräzision der Positionierung einer Achse<br>$R_i = 4 \cdot s_i$                                                                                             | NE*       |
| <b>U</b>             | <b>B</b>             | Umkehrspanne<br>$U_j =  x_{j,p} - x_{j,n} $                                                                             | Umkehrspanne einer Achse<br>$B_i = \bar{x}_{i,p} - \bar{x}_{i,n}$                                                                                                                | NE        |
| <b>s<sub>j</sub></b> | <b>s</b>             | Standardabweichung der Messwerte<br>$s_{j,p(n)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij,p(n)} - \bar{x}_{j,p(n)})^2}$ | Schätzwert der einseitigen Standardunsicherheit der Positionierung an einer Position<br>$s_{i,p(n)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij,p(n)} - \bar{x}_{i,p(n)})^2}$      | ANO       |
| <b>x</b>             | <b>x</b>             | Systematische Abweichung vom Sollwert am Ort x <sub>j</sub>                                                             | Gemittelte zweiseitige Positionsabweichung an einer Position                                                                                                                     | NE        |

|  |  |                                                             |                                                       |  |
|--|--|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--|
|  |  | $\bar{\bar{x}}_j = \frac{\bar{x}_{j,p} + \bar{x}_{j,n}}{2}$ | $\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_{i,p} + \bar{x}_{i,n}}{2}$ |  |
|--|--|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--|

\* odlišnost v hodnotě (6.sj a 4.si).

#### 16.1.4 Dle úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

Nejistota měření je v souladu s GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) a VIM (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology) definována jako: „**Parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně prisuzovány k měřené veličině.**“

Téměř vždy je třeba počítat s tím, že nejistota měření je způsobena řadou vlivů, které se na ní podílejí. Mluvíme pak o jednotlivých složkách nejistoty měření, které se podílejí na výsledné nejistotě daného měření [52, str. 20]. Dokument [52] se zabývá principy a požadavky na stanovení nejistoty měření při kalibracích a není nutné se s ním dále zabývat s hlediska terminologie pro stanovení přesnosti polohování obráběcích strojů.

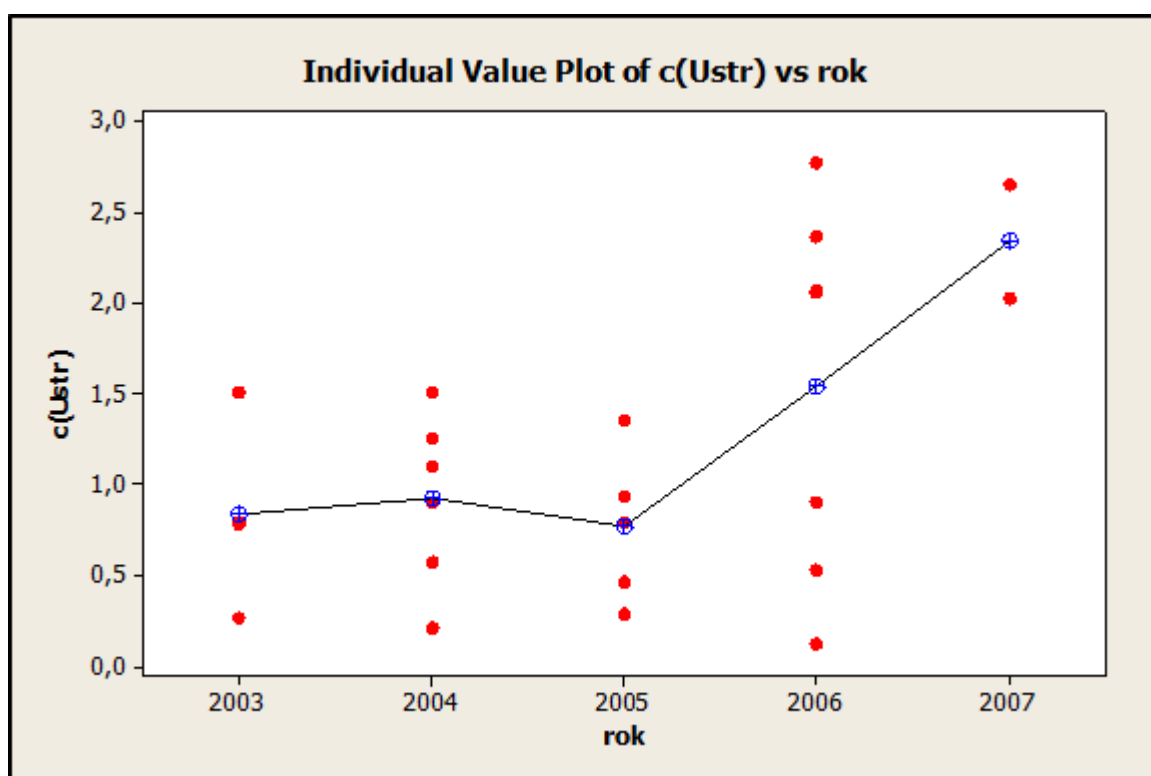
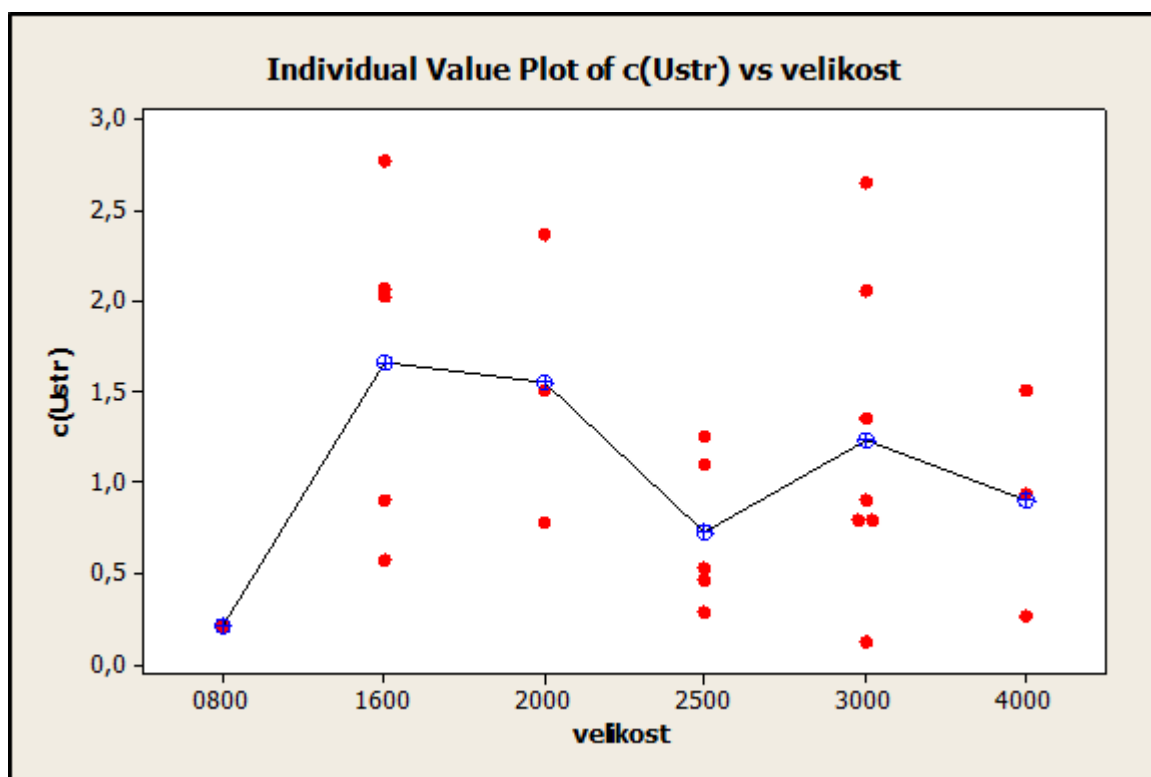
#### 16.1.5 Zhodnocení

Na základě provedené rešerše terminologie z příslušných norem ČSN ISO 230 a DIN ISO 230, dále směrnice VDI/DGQ 3441, která byla vyžádána pro sjednocení terminologie byla zjištěna tato fakta:

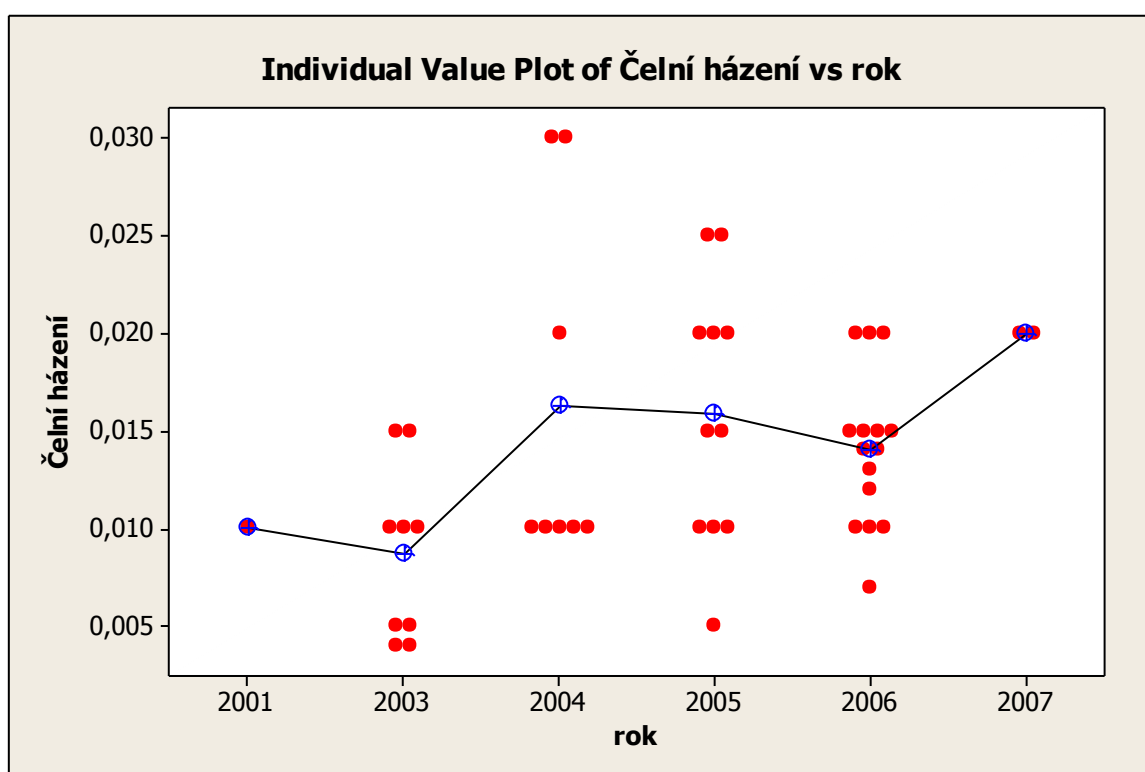
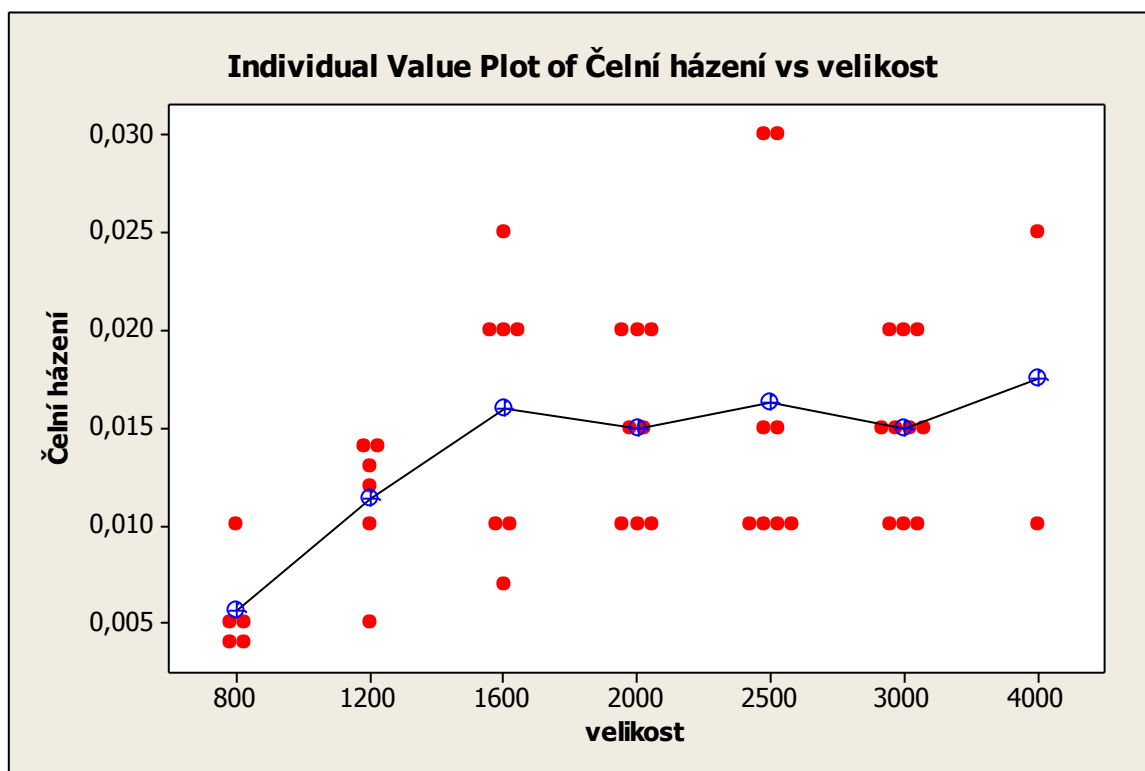
- Pojem „Positionsunsicherheit“ označovaný dle směrnice VDI jako „P“ a překládaný jako „nejistota polohování“ je z hlediska překladu nesprávný!!! Tento pojem je vyložen také jako „Positionsunsicherheit“ a označovaný dle norem DIN ISO a ČSN ISO jako „A“ a dle vyhodnocení (z grafu, z výpočtového algoritmu) má stejný význam. Jeho překlad je potom vyložen v normě ČSN ISO jako „přesnost nastavení polohy v ose“. Proto dále navrhuji držet a používat tento pojem bez možností náhrady pojmem „nejistota polohování“, který dle norem má označení „s“ a doslova zní „odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v poloze“. Rozdíl lze potom vyčíst z obrázků 1 a 2.
- Jelikož je norma ISO nadřazená směrnícím VDI, doporučuji se držet této terminologie. Pro další přejímání pojmů tzv. doslovným překladem by se mělo zabránit podobným srovnáním, který byl výše naznačen a zabránit tak nedorozumění v oblasti měření a vyhodnocení např. „přesnosti“ obráběcích strojů.

## 16.2 PŘÍLOHA Č. 2 – PŘESNOST CHODU ROTAČNÍ DESKY

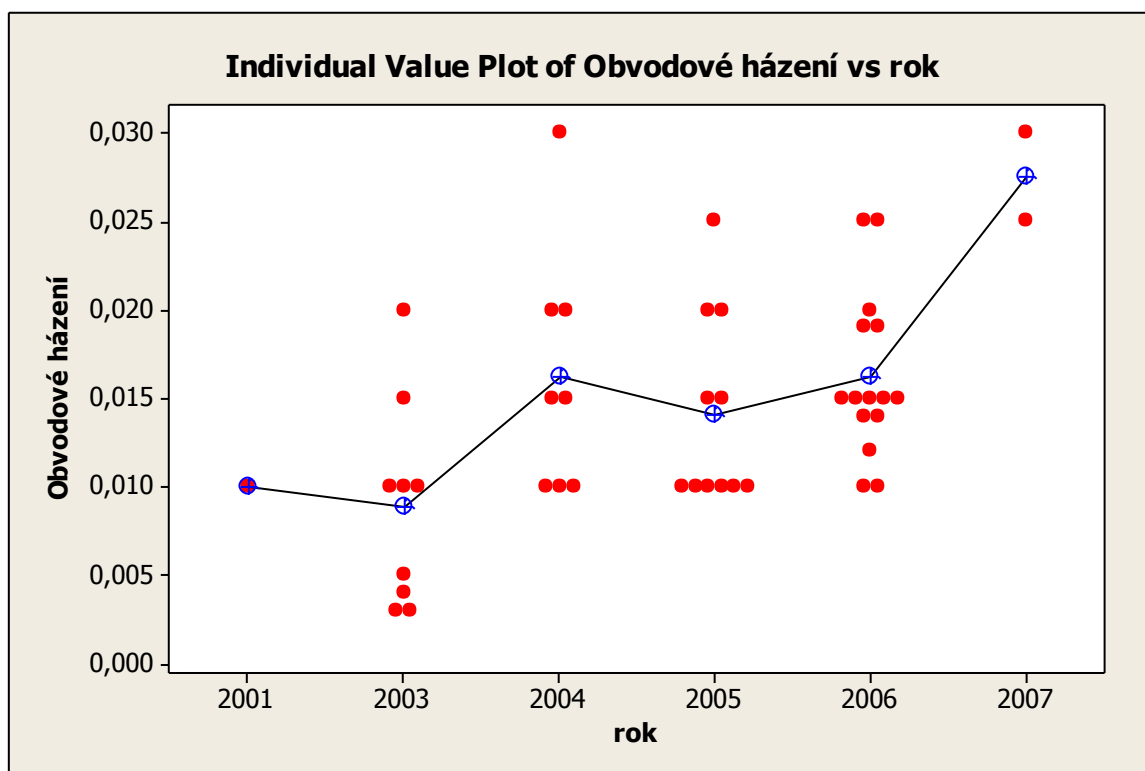
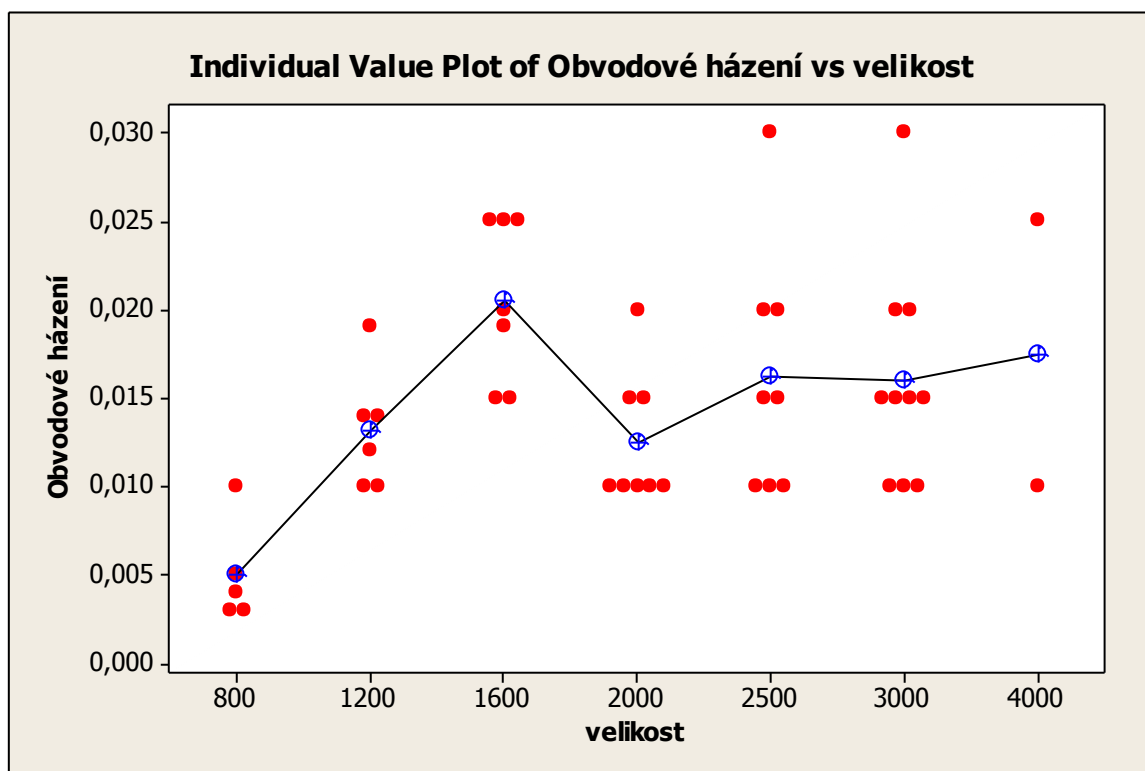
Nejistota stavění polohy C-osy



Velikost čelního házení desky závislé na velikosti a roku výroby

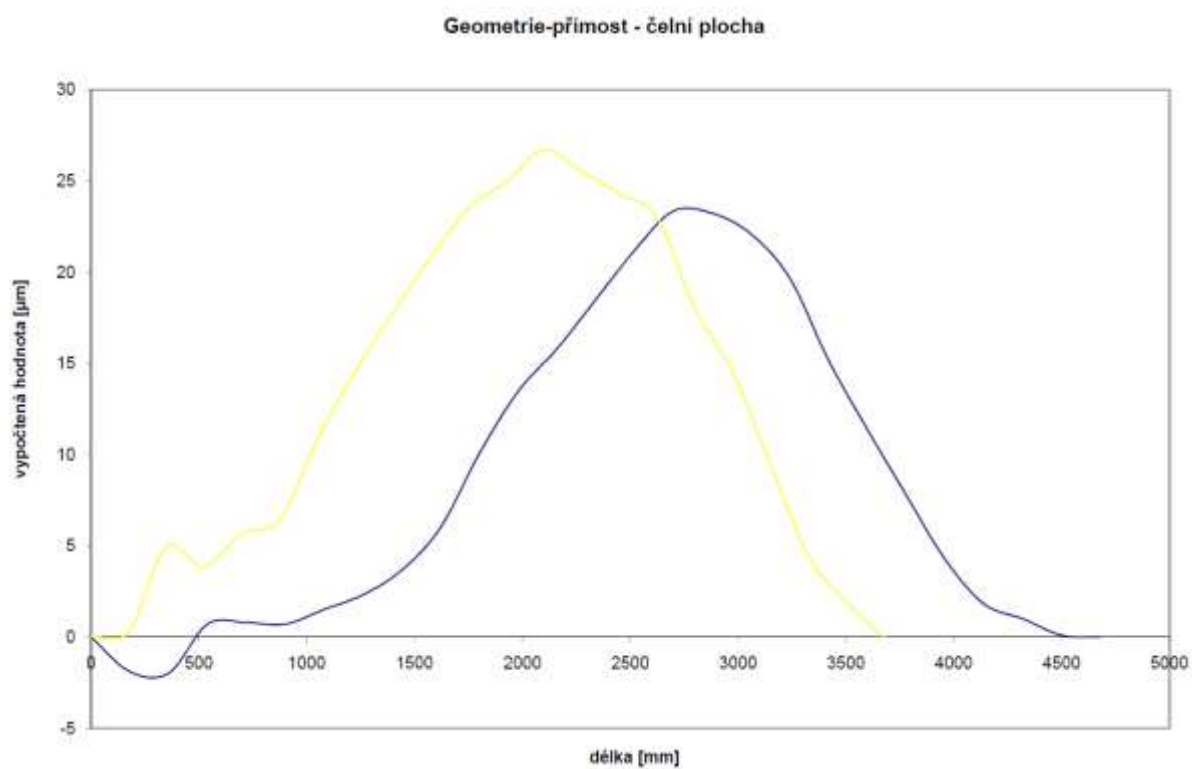
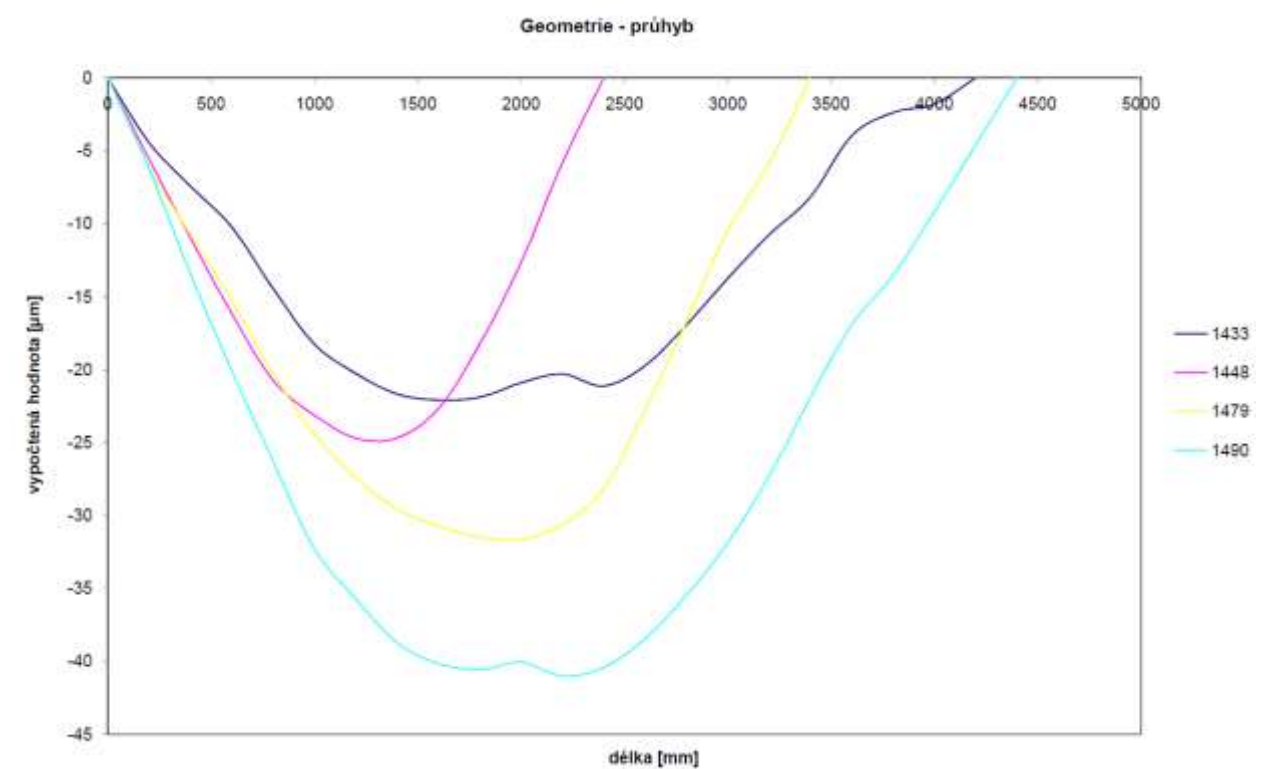


Velikost obvodového házení desky závislé na velikosti a roku výroby



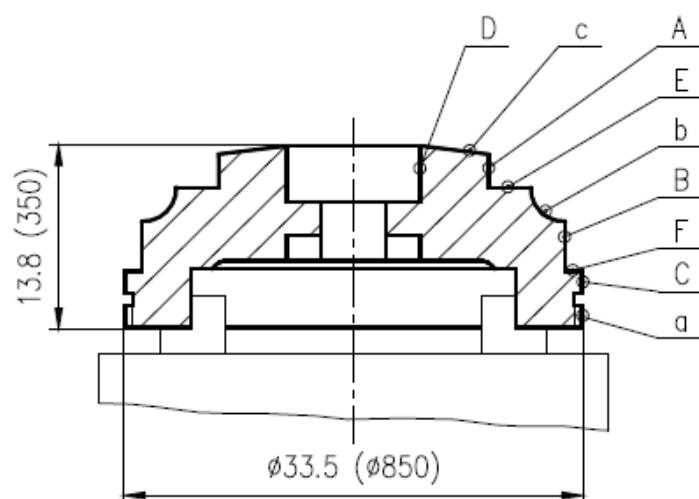


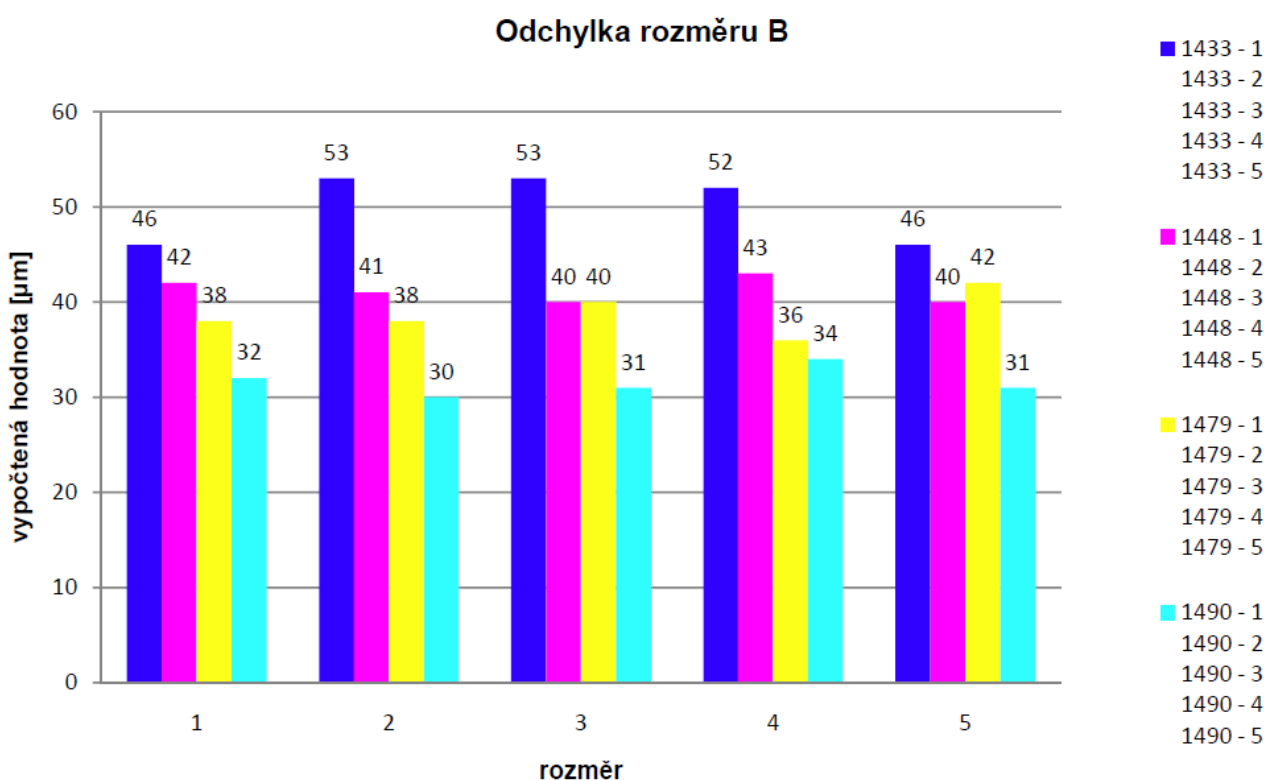
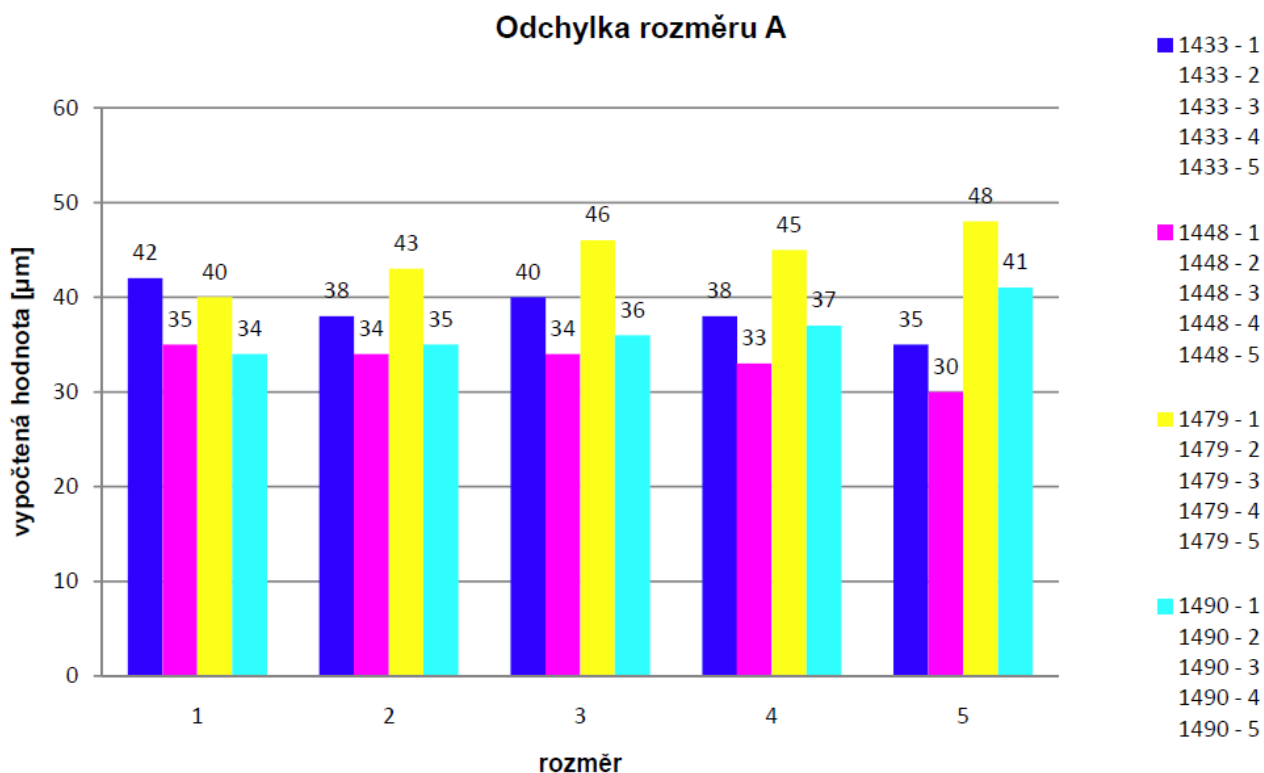
### 16.3 PŘÍLOHA Č. 3 – PŘESNOST KONSTRUKČNÍCH UZLŮ NA TCP



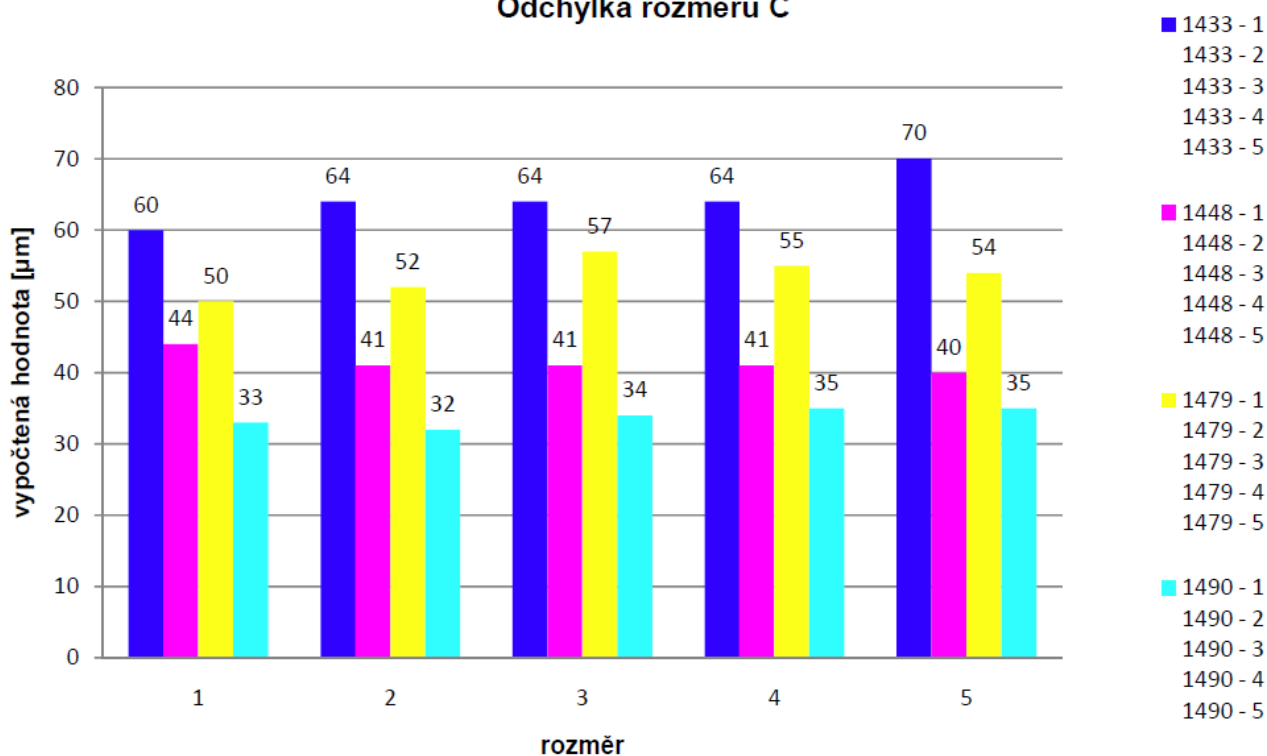
**Zkouška přesnosti**

|          | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> | <b>F</b> |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1433 - 1 | 42       | 46       | 60       | 56       | 27       | 39       |
| 1433 - 2 | 38       | 53       | 64       | 51       | 30       | 44       |
| 1433 - 3 | 40       | 53       | 64       | 52       | 29       | 38       |
| 1433 - 4 | 38       | 52       | 64       | 54       | 28       | 39       |
| 1433 - 5 | 35       | 46       | 70       | 52       | 26       | 38       |
| 1448 - 1 | 35       | 42       | 44       | 20       | 30       | 32       |
| 1448 - 2 | 34       | 41       | 41       | 24       | 30       | 30       |
| 1448 - 3 | 34       | 40       | 41       | 24       | 28       | 30       |
| 1448 - 4 | 33       | 43       | 41       | 24       | 26       | 26       |
| 1448 - 5 | 30       | 40       | 40       | 21       | 24       | 25       |
| 1479 - 1 | 40       | 38       | 50       | 36       | 29       | 17       |
| 1479 - 2 | 43       | 38       | 52       | 38       | 28       | 22       |
| 1479 - 3 | 46       | 40       | 57       | 38       | 28       | 24       |
| 1479 - 4 | 45       | 36       | 55       | 36       | 29       | 25       |
| 1479 - 5 | 48       | 42       | 54       | 35       | 26       | 25       |
| 1490 - 1 | 34       | 32       | 33       | 25       | 43       | 40       |
| 1490 - 2 | 35       | 30       | 32       | 23       | 40       | 42       |
| 1490 - 3 | 36       | 31       | 34       | 29       | 40       | 41       |
| 1490 - 4 | 37       | 34       | 35       | 26       | 40       | 39       |
| 1490 - 5 | 41       | 31       | 35       | 22       | 39       | 40       |

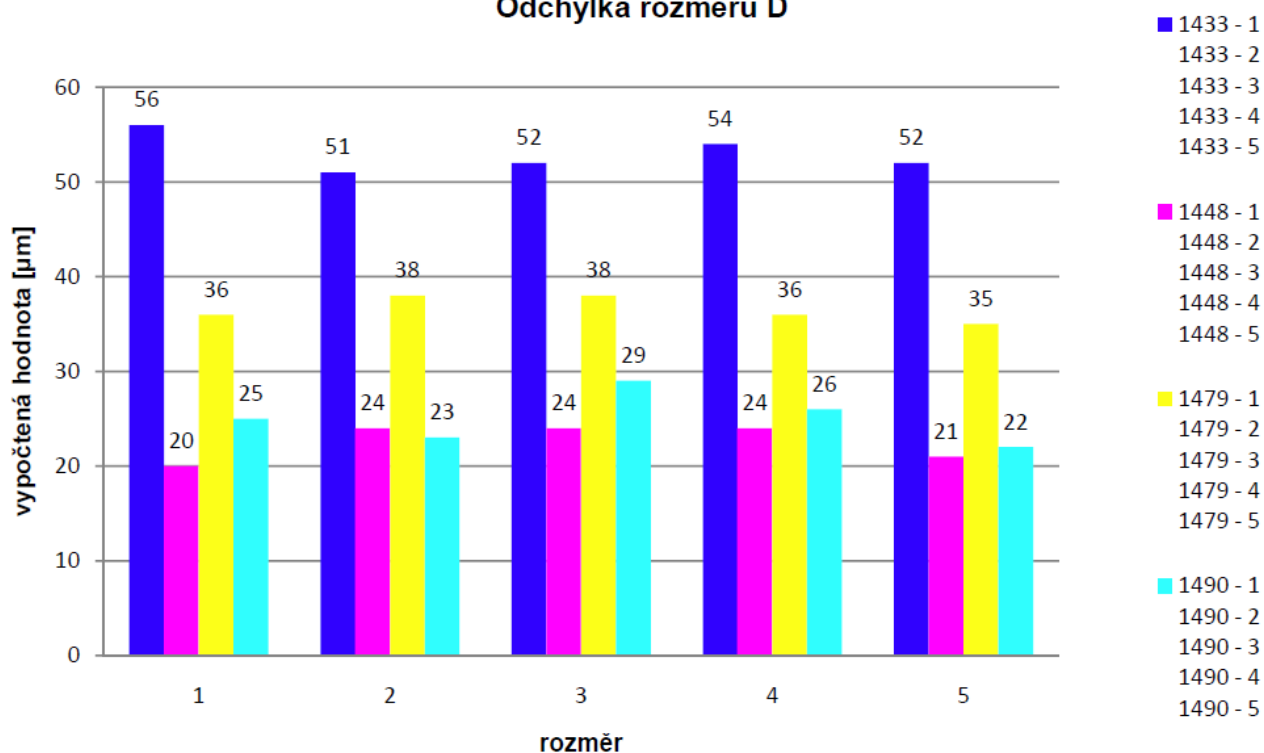




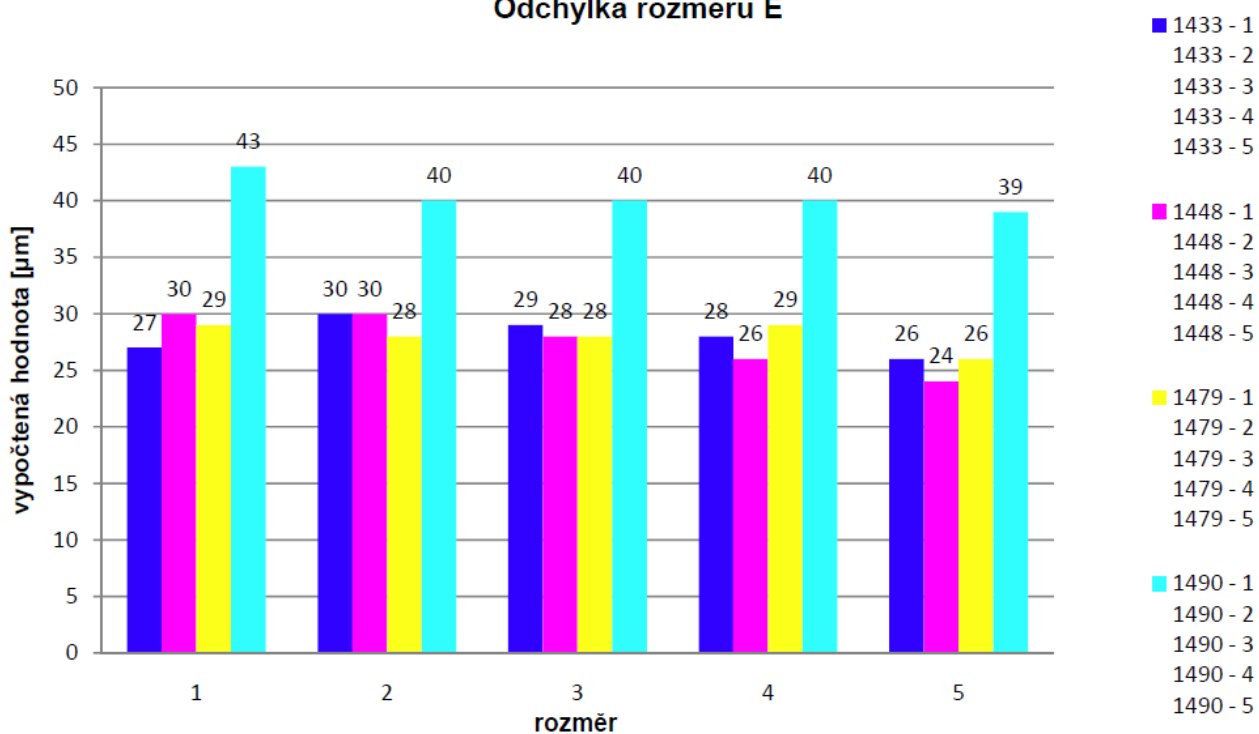
Odchylka rozměru C



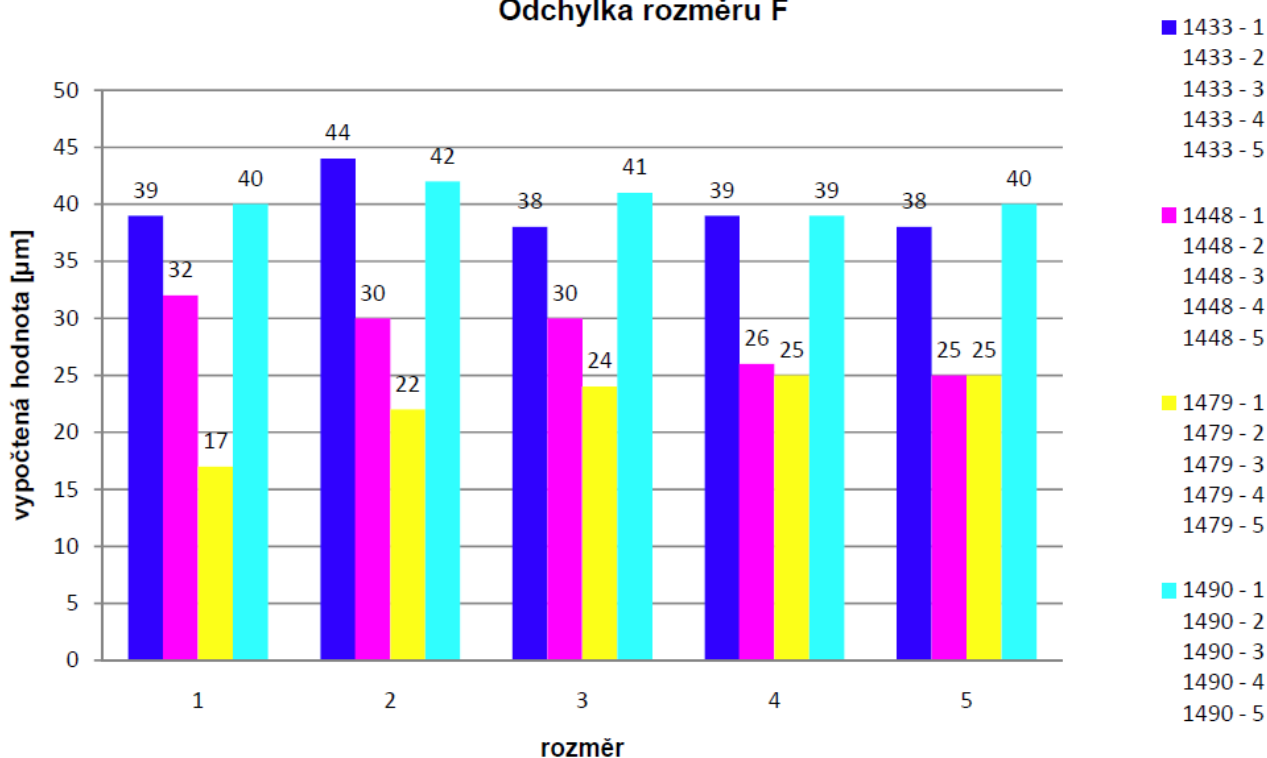
Odchylka rozměru D



Odchylka rozměru E



Odchylka rozměru F



## 16.4 PŘÍLOHA ČÍSLO 4 – VÝSLEDKY MĚŘENÍ LINEÁRNÍCH OS

### Zdrojové data pro kompenzaci osy X svislého soustruhu

HEADER::  
File type : RTL  
Owner : Linear  
Version no : V5.2.2

TARGET DATA::  
Filetype : ISO  
Target-count: 14  
Targets :  
20.000000 180.000000 340.000000 500.000000 660.000000  
820.000000 980.000000 1140.000000 1300.000000 1460.000000  
1620.000000 1780.000000 1940.000000 2100.000000  
Flags: 0 0 2 1

USER-TEXT::  
Machine:SKIQ30  
Serial No :1604  
Date:07:47 Nov 10 2010  
By:M.Skarupa  
Axis :X  
Location:TOSHULIN  
Popis:with compensation

ENVIRONMENT::  
Air temp : 20.465730 20.467500 0  
Air press : 96.753690 96.782380 1  
Air humid : 55.138330 55.328260  
Mat temp 1 : -10.000000 -10.000000 0  
Mat temp 2 : -10.000000 -10.000000 0  
Mat temp 3 : 20.489460 20.488340 0  
Env factor : 0.31641167 0.31641165  
Exp coeff : 11.700000 11.700000 0  
Date Time : "07:48 Nov 10 2010" "08:07 Nov 10 2010"

#### DEVIATIONS::

##### Run Target Data:

|      |        |      |        |      |        |      |        |       |        |
|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|-------|--------|
| 1 1  | -0.100 | 3 1  | -2.100 | 5 1  | -2.600 | 7 1  | -2.400 | 9 1   | -1.400 |
| 1 2  | 0.100  | 3 2  | -1.000 | 5 2  | -0.100 | 7 2  | 0.100  | 9 2   | -0.700 |
| 1 3  | 2.500  | 3 3  | 1.500  | 5 3  | 1.300  | 7 3  | 1.500  | 9 3   | 2.200  |
| 1 4  | 2.000  | 3 4  | 0.300  | 5 4  | 0.700  | 7 4  | 0.700  | 9 4   | 1.500  |
| 1 5  | 2.900  | 3 5  | 0.900  | 5 5  | 1.100  | 7 5  | 1.600  | 9 5   | 2.400  |
| 1 6  | 3.800  | 3 6  | 2.300  | 5 6  | 3.000  | 7 6  | 3.200  | 9 6   | 3.900  |
| 1 7  | 4.800  | 3 7  | 3.000  | 5 7  | 3.300  | 7 7  | 4.100  | 9 7   | 5.000  |
| 1 8  | 3.200  | 3 8  | 2.100  | 5 8  | 2.100  | 7 8  | 4.000  | 9 8   | 4.500  |
| 1 9  | 3.300  | 3 9  | 2.100  | 5 9  | 2.200  | 7 9  | 2.500  | 9 9   | 3.700  |
| 1 10 | 2.700  | 3 10 | 2.400  | 5 10 | 2.500  | 7 10 | 3.600  | 9 10  | 3.300  |
| 1 11 | 2.100  | 3 11 | 2.000  | 5 11 | 1.700  | 7 11 | 3.200  | 9 11  | 3.200  |
| 1 12 | 3.700  | 3 12 | 3.000  | 5 12 | 2.900  | 7 12 | 4.500  | 9 12  | 4.600  |
| 1 13 | 1.900  | 3 13 | 2.000  | 5 13 | 1.800  | 7 13 | 3.400  | 9 13  | 3.100  |
| 1 14 | 1.700  | 3 14 | 0.700  | 5 14 | 1.500  | 7 14 | 3.000  | 9 14  | 2.900  |
| 2 14 | 6.200  | 4 14 | 6.000  | 6 14 | 7.000  | 8 14 | 8.000  | 10 14 | 9.000  |
| 2 13 | 3.300  | 4 13 | 3.900  | 6 13 | 4.900  | 8 13 | 5.700  | 10 13 | 7.000  |
| 2 12 | 3.700  | 4 12 | 2.600  | 6 12 | 4.100  | 8 12 | 5.200  | 10 12 | 6.400  |
| 2 11 | 3.000  | 4 11 | 3.300  | 6 11 | 3.800  | 8 11 | 4.300  | 10 11 | 6.100  |
| 2 10 | 4.700  | 4 10 | 5.200  | 6 10 | 5.600  | 8 10 | 5.300  | 10 10 | 6.400  |
| 2 9  | 4.500  | 4 9  | 4.400  | 6 9  | 5.300  | 8 9  | 5.200  | 10 9  | 5.700  |
| 2 8  | 7.400  | 4 8  | 7.200  | 6 8  | 8.300  | 8 8  | 9.000  | 10 8  | 8.700  |
| 2 7  | 5.900  | 4 7  | 5.900  | 6 7  | 6.200  | 8 7  | 6.900  | 10 7  | 7.100  |
| 2 6  | 3.400  | 4 6  | 3.400  | 6 6  | 4.000  | 8 6  | 4.000  | 10 6  | 4.800  |
| 2 5  | 3.300  | 4 5  | 3.100  | 6 5  | 3.200  | 8 5  | 3.400  | 10 5  | 4.400  |
| 2 4  | 2.100  | 4 4  | 2.200  | 6 4  | 2.300  | 8 4  | 2.400  | 10 4  | 3.000  |
| 2 3  | 3.900  | 4 3  | 3.900  | 6 3  | 3.600  | 8 3  | 4.900  | 10 3  | 4.700  |
| 2 2  | 1.600  | 4 2  | 2.100  | 6 2  | 1.700  | 8 2  | 2.000  | 10 2  | 2.100  |
| 2 1  | -4.300 | 4 1  | -3.800 | 6 1  | -4.500 | 8 1  | -4.000 | 10 1  | -3.600 |

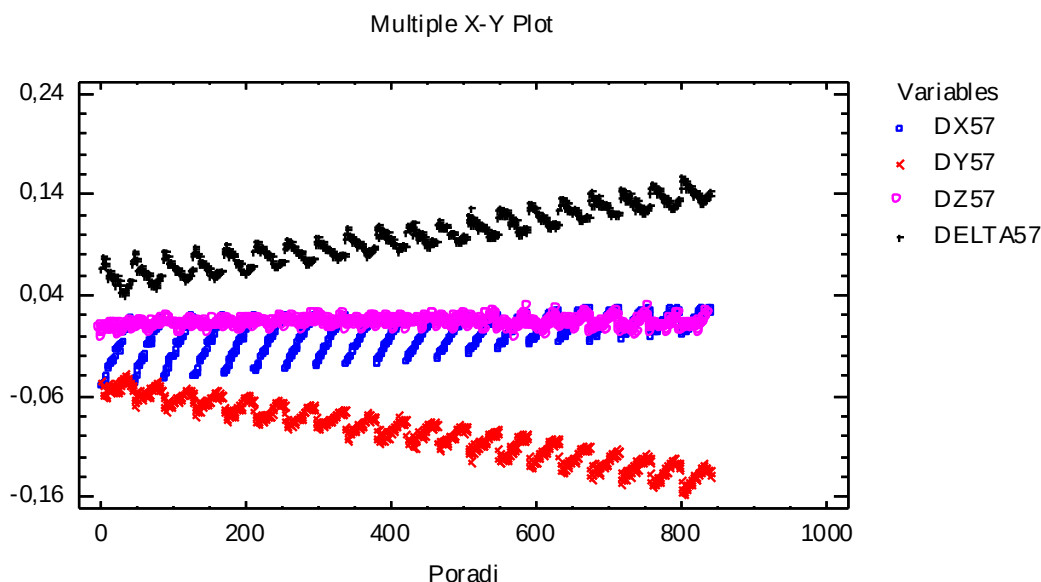


## 16.5 PŘÍLOHA ČÍSLO 5 - HODNOTY TABULKY PRO STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT

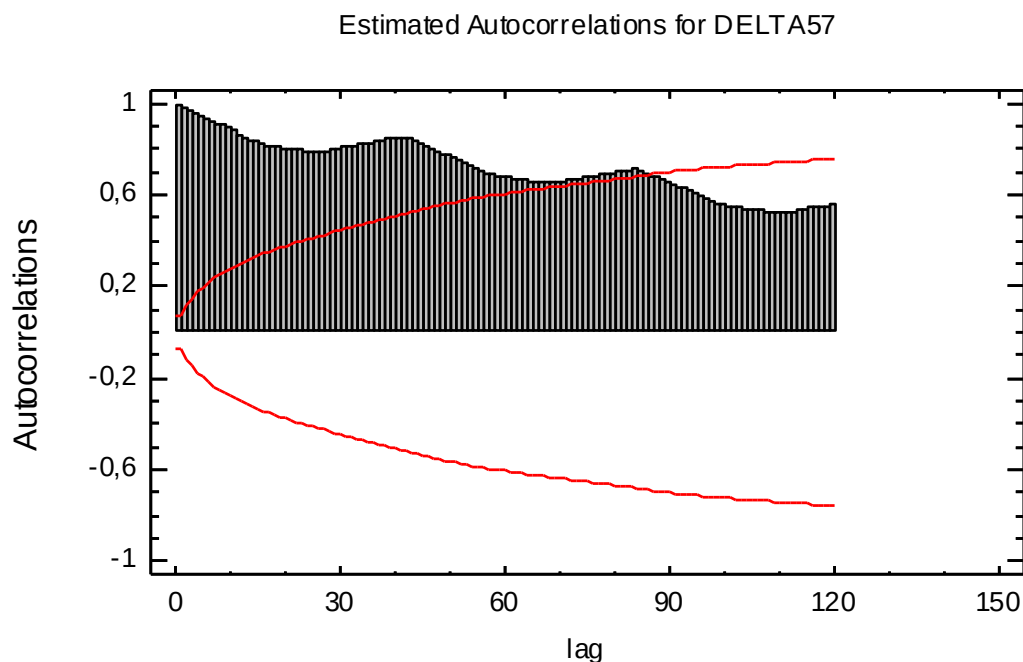
| Poradí | X    | Y | Z | DX57 | DY57   | DZ57   | DELTA57 | DX58     | DY58   | DZ58   | DELTA58 | DX59     | DY59   | DZ59   | DELTA59 | DX60     | DY60   | DZ60   | DELTA60 | DX61     | DY61   | DZ61   | DELTA61 |          |
|--------|------|---|---|------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|---------|----------|
| 1      | 0    | 0 | 0 | 0    | -0,048 | -0,047 | 0,007   | 0,067543 | -0,032 | -0,041 | 0,004   | 0,052163 | -0,024 | -0,045 | 0,008   | 0,051624 | -0,025 | -0,039 | -0,001  | 0,046883 | -0,016 | -0,024 | 0,004   | 0,02912  |
| 2      | 40   | 0 | 0 | 0    | -0,049 | -0,051 | 0,008   | 0,077176 | -0,033 | -0,05  | 0,009   | 0,060581 | -0,024 | -0,045 | 0,01    | 0,051971 | -0,025 | -0,041 | -0,003  | 0,048114 | -0,014 | -0,028 | 0,004   | 0,031559 |
| 3      | 80   | 0 | 0 | 0    | -0,049 | -0,06  | 0,001   | 0,077473 | -0,033 | -0,059 | 0       | 0,067602 | -0,022 | -0,058 | 0,001   | 0,062004 | -0,022 | -0,04  | -0,017  | 0,048713 | -0,013 | -0,036 | -0,004  | 0,038484 |
| 4      | 120  | 0 | 0 | 0    | -0,047 | -0,059 | -0,002  | 0,075459 | -0,032 | -0,062 | 0,002   | 0,0698   | -0,022 | -0,057 | 0,001   | 0,061106 | -0,024 | -0,047 | -0,009  | 0,053535 | -0,013 | -0,037 | -0,002  | 0,039268 |
| 5      | 160  | 0 | 0 | 0    | -0,044 | -0,061 | 0,001   | 0,07522  | -0,029 | -0,061 | 0,007   | 0,067904 | -0,02  | -0,056 | 0,005   | 0,059674 | -0,024 | -0,049 | -0,007  | 0,055009 | -0,014 | -0,038 | 0       | 0,040497 |
| 6      | 200  | 0 | 0 | 0    | -0,044 | -0,061 | 0,006   | 0,075452 | -0,028 | -0,056 | 0,007   | 0,063    | -0,02  | -0,052 | 0,009   | 0,056436 | -0,023 | -0,046 | -0,009  | 0,052211 | -0,013 | -0,034 | -0,001  | 0,036414 |
| 7      | 240  | 0 | 0 | 0    | -0,04  | -0,059 | 0,006   | 0,071533 | -0,025 | -0,057 | 0,011   | 0,064109 | -0,018 | -0,048 | 0,009   | 0,052048 | -0,022 | -0,041 | -0,006  | 0,046573 | -0,013 | -0,034 | 0,004   | 0,03662  |
| 8      | 280  | 0 | 0 | 0    | -0,038 | -0,058 | 0,006   | 0,069599 | -0,024 | -0,057 | 0,008   | 0,062362 | -0,016 | -0,053 | 0,005   | 0,055588 | -0,021 | -0,042 | -0,006  | 0,047339 | -0,012 | -0,031 | 0,001   | 0,033257 |
| 9      | 320  | 0 | 0 | 0    | -0,033 | -0,053 | 0,008   | 0,062944 | -0,021 | -0,053 | 0,01    | 0,057879 | -0,015 | -0,047 | 0,008   | 0,04998  | -0,018 | -0,039 | -0,004  | 0,043139 | -0,012 | -0,028 | 0,008   | 0,031496 |
| 10     | 360  | 0 | 0 | 0    | -0,03  | -0,048 | 0,006   | 0,056921 | -0,019 | -0,05  | 0,01    | 0,054415 | -0,013 | -0,045 | 0,007   | 0,04736  | -0,019 | -0,036 | -0,004  | 0,040902 | -0,013 | -0,029 | 0,008   | 0,032772 |
| 11     | 400  | 0 | 0 | 0    | -0,03  | -0,045 | 0,006   | 0,058617 | -0,017 | -0,05  | 0,009   | 0,053572 | -0,011 | -0,04  | 0,006   | 0,041917 | -0,018 | -0,034 | -0,006  | 0,038936 | -0,012 | -0,026 | 0,004   | 0,028914 |
| 12     | 440  | 0 | 0 | 0    | -0,028 | -0,055 | 0,006   | 0,062008 | -0,015 | -0,055 | 0,01    | 0,057879 | -0,009 | -0,046 | 0,006   | 0,047255 | -0,015 | -0,042 | -0,008  | 0,04531  | -0,01  | -0,03  | 0,006   | 0,032187 |
| 13     | 480  | 0 | 0 | 0    | -0,028 | -0,057 | 0,01    | 0,064288 | -0,015 | -0,056 | 0,011   | 0,059008 | -0,01  | -0,053 | 0,01    | 0,054854 | -0,015 | -0,041 | -0,004  | 0,043841 | -0,01  | -0,034 | 0,007   | 0,036125 |
| 14     | 520  | 0 | 0 | 0    | -0,025 | -0,054 | 0,005   | 0,059716 | -0,015 | -0,057 | 0,01    | 0,059783 | -0,01  | -0,049 | 0,008   | 0,050646 | -0,014 | -0,038 | -0,003  | 0,040608 | -0,009 | -0,031 | 0,006   | 0,032833 |
| 15     | 560  | 0 | 0 | 0    | -0,024 | -0,049 | 0,003   | 0,054644 | -0,013 | -0,053 | 0,008   | 0,055154 | -0,009 | -0,045 | 0,008   | 0,046583 | -0,014 | -0,039 | -0,003  | 0,041545 | -0,01  | -0,028 | 0,004   | 0,03     |
| 16     | 600  | 0 | 0 | 0    | -0,025 | -0,053 | 0,011   | 0,059624 | -0,013 | -0,055 | 0,013   | 0,057991 | -0,009 | -0,051 | 0,015   | 0,053917 | -0,015 | -0,039 | -0,001  | 0,041797 | -0,011 | -0,029 | 0,01    | 0,032588 |
| 17     | 640  | 0 | 0 | 0    | -0,025 | -0,052 | 0,005   | 0,057914 | -0,013 | -0,054 | 0,008   | 0,056116 | -0,008 | -0,048 | 0,008   | 0,049315 | -0,014 | -0,038 | -0,004  | 0,040694 | -0,01  | -0,027 | 0,007   | 0,029631 |
| 18     | 680  | 0 | 0 | 0    | -0,023 | -0,055 | 0,003   | 0,059691 | -0,011 | -0,053 | 0,004   | 0,054277 | -0,005 | -0,044 | 0,004   | 0,044463 | -0,012 | -0,037 | -0,007  | 0,039522 | -0,007 | -0,028 | 0,001   | 0,028879 |
| 19     | 720  | 0 | 0 | 0    | -0,019 | -0,047 | 0,003   | 0,050784 | -0,006 | -0,051 | 0,008   | 0,051971 | -0,005 | -0,046 | 0,006   | 0,046658 | -0,01  | -0,036 | -0,002  | 0,037417 | -0,006 | -0,025 | 0,005   | 0,026192 |
| 20     | 760  | 0 | 0 | 0    | -0,012 | -0,052 | 0,01    | 0,054295 | -0,003 | -0,051 | 0,011   | 0,052259 | -0,001 | -0,046 | 0,012   | 0,04755  | -0,011 | -0,038 | 0,001   | 0,039573 | -0,009 | -0,026 | 0,009   | 0,028948 |
| 21     | 800  | 0 | 0 | 0    | -0,013 | -0,056 | 0,011   | 0,058532 | -0,002 | -0,052 | 0,012   | 0,053404 | 0      | -0,044 | 0,012   | 0,045607 | -0,009 | -0,036 | -0,001  | 0,037121 | -0,008 | -0,024 | 0,008   | 0,026533 |
| 22     | 840  | 0 | 0 | 0    | -0,013 | -0,056 | 0,011   | 0,058532 | -0,002 | -0,053 | 0,011   | 0,054166 | 0,001  | -0,047 | 0,009   | 0,047864 | -0,008 | -0,037 | -0,001  | 0,037868 | -0,006 | -0,025 | 0,008   | 0,026926 |
| 23     | 880  | 0 | 0 | 0    | -0,01  | -0,053 | 0,005   | 0,054166 | 0      | -0,053 | 0,008   | 0,0536   | 0,002  | -0,048 | 0,007   | 0,048549 | -0,006 | -0,031 | -0,004  | 0,031828 | -0,005 | -0,024 | 0,005   | 0,02502  |
| 24     | 920  | 0 | 0 | 0    | -0,01  | -0,053 | 0,005   | 0,054166 | -0,001 | -0,053 | 0,008   | 0,05361  | 0,003  | -0,043 | 0,005   | 0,043394 | -0,005 | -0,034 | -0,003  | 0,034496 | -0,002 | -0,02  | 0,003   | 0,020322 |
| 25     | 960  | 0 | 0 | 0    | -0,009 | -0,053 | 0,002   | 0,053796 | 0,002  | -0,046 | 0,006   | 0,046433 | 0,005  | -0,042 | 0,002   | 0,042344 | -0,005 | -0,034 | -0,003  | 0,034496 | -0,002 | -0,02  | 0,003   | 0,020322 |
| 26     | 1000 | 0 | 0 | 0    | -0,007 | -0,048 | 0,001   | 0,048518 | 0,003  | -0,045 | 0,004   | 0,043277 | 0,005  | -0,043 | 0,003   | 0,043394 | -0,004 | -0,029 | -0,008  | 0,030348 | -0,002 | -0,02  | 0,001   | 0,020125 |
| 27     | 1040 | 0 | 0 | 0    | -0,014 | -0,047 | 0,005   | 0,049295 | -0,001 | -0,044 | 0       | 0,044011 | 0,004  | -0,042 | 0,001   | 0,042202 | -0,004 | -0,03  | -0,007  | 0,031064 | -0,003 | -0,018 | -0,001  | 0,018276 |
| 28     | 1080 | 0 | 0 | 0    | -0,007 | -0,043 | -0,001  | 0,043578 | 0,002  | -0,041 | 0,003   | 0,041158 | 0,005  | -0,039 | 0,004   | 0,039522 | -0,003 | -0,026 | -0,007  | 0,027092 | -0,001 | -0,016 | -0,001  | 0,016062 |
| 29     | 1120 | 0 | 0 | 0    | -0,006 | -0,044 | 0,008   | 0,045122 | 0,006  | -0,041 | 0,012   | 0,043139 | 0,005  | -0,039 | 0,013   | 0,041413 | -0,004 | -0,028 | 0,003   | 0,028443 | -0,004 | -0,016 | 0,01    | 0,019287 |
| 30     | 1160 | 0 | 0 | 0    | 0,003  | -0,044 | 0,011   | 0,045453 | 0,01   | -0,039 | 0,011   | 0,041737 | 0,009  | -0,037 | 0,014   | 0,042403 | -0,003 | -0,028 | 0,005   | 0,028601 | -0,001 | -0,017 | 0,012   | 0,020833 |
| 31     | 1200 | 0 | 0 | 0    | 0,004  | -0,042 | 0,004   | 0,043279 | 0,01   | -0,039 | 0,009   | 0,041255 | 0,011  | -0,036 | 0,011   | 0,039875 | -0,002 | -0,026 | 0       | 0,026077 | -0,001 | -0,013 | 0,004   | 0,013638 |
| 32     | 1240 | 0 | 0 | 0    | 0,006  | -0,042 | 0,007   | 0,043    | 0,012  | -0,04  | 0,011   | 0,043186 | 0,011  | -0,036 | 0,011   | 0,039217 | -0,001 | -0,025 | 0,001   | 0,02504  | -0,002 | -0,014 | 0,006   | 0,015362 |
| 33     | 1280 | 0 | 0 | 0    | 0,006  | -0,04  | 0,001   | 0,04046  | 0,012  | -0,04  | 0,008   | 0,042521 | 0,011  | -0,035 | 0,01    | 0,038026 | -0,001 | -0,025 | -0,002  | 0,0251   | 0      | -0,016 | 0,004   | 0,016492 |
| 34     | 1320 | 0 | 0 | 0    | 0,006  | -0,045 | 0,005   | 0,045673 | 0,012  | -0,041 | 0,008   | 0,043463 | 0,01   | -0,038 | 0,01    | 0,040804 | 0      | -0,026 | -0,003  | 0,026173 | -0,001 | -0,017 | 0,003   | 0,017292 |
| 35     | 1360 | 0 | 0 | 0    | 0,007  | -0,047 | 0,006   | 0,047896 | 0,012  | -0,044 | 0,011   | 0,046915 | 0,012  | -0,042 | 0,014   | 0,045869 | 0,001  | -0,026 | -0,002  | 0,026096 | -0,002 | -0,018 | 0,004   | 0,018547 |
| 36     | 1400 | 0 | 0 | 0    | 0,011  | -0,045 | 0,007   | 0,046851 | 0,015  | -0,042 | 0,013   | 0,046454 | 0,013  | -0,04  | 0,014   | 0,044328 | 0,002  | -0,028 | 0,003   | 0,028231 | -0,002 | -0,018 | 0,009   | 0,020224 |
| 37     | 1440 | 0 | 0 | 0    | 0,007  | -0,048 | 0,009   | 0,049336 | 0,013  | -0,042 | 0,013   | 0,045848 | 0,013  | -0,04  | 0,014   | 0,044328 | 0,003  | -0,028 | 0,002   | 0,028231 | 0      | -0,018 | 0,009   | 0,020125 |
| 38     | 1480 | 0 | 0 | 0    | 0,009  | -0,049 | 0,007   | 0,050309 | 0,014  | -0,044 | 0,012   | 0,047707 | 0,012  | -0,047 | 0,015   | 0,050774 | 0,004  | -0,028 | 0,001   | 0,028302 | 0,001  | -0,019 | 0,005   | 0,019672 |
| 39     | 1520 | 0 | 0 | 0    | 0,014  | -0,051 | 0,008   | 0,053488 | 0,019  | -0,044 | 0,013   | 0,049659 | 0,017  | -0,043 | 0,014   | 0,048311 | 0,005  | -0,029 | 0,002   | 0,029496 | 0      | -0,017 | 0,007   | 0,018385 |
| 40     | 1560 | 0 | 0 | 0    | 0,018  | -0,049 | 0,012   | 0,053563 | 0,022  | -0,041 | 0,016   | 0,049204 | 0,018  | -0,041 | 0,018   | 0,04826  | 0,006  | -0,027 | 0,005   | 0,028107 | 0,001  | -0,017 | 0,009   | 0,019261 |
| 41     | 1600 | 0 | 0 | 0    | 0,016  | -0,05  | 0,012   | 0,053852 | 0,021  | -0,042 | 0,014   | 0,049    | 0,02   | -0,042 | 0,014   | 0,04858  | 0,007  | -0,029 | 0,003   | 0,029983 | 0,002  | -0,016 | 0,007   | 0,017578 |
| 42     | 1640 | 0 | 0 | 0    | 0,016  | -0,05  | 0,009   | 0,053263 | 0,021  | -0,041 | 0,013   | 0,047864 | 0,017  | -0,044 | 0,014   | 0,049204 | 0,006  | -0,031 | 0,002   | 0,031639 | 0,002  | -0,018 | 0,004   | 0,018547 |
| 43     | 0    | 0 | 0 | 0    | -0,045 | -0,053 | 0,011   | 0,070392 | -0,032 | -0,055 | 0,01    | 0,064113 | -0,022 | -0,049 | 0,009   | 0,054461 | -0,023 | -0,04  | 0       | 0,046141 | -0,015 | -0,026 | 0,001   | 0,030033 |
| 44     | 40   | 0 | 0 | 0    | -0,046 | -0,057 | 0,014   | 0,074572 | -0,034 | -0,06  | 0,012   | 0,07     | -0,022 | -0,054 | 0,014   | 0,059967 | -0,023 | -0,051 | 0,007   | 0,056383 | -0,011 | -0,021 | 0       | 0,023707 |
| 45     | 80   | 0 | 0 | 0    | -0,046 | -0,066 | 0,007   | 0,080753 | -0,032 | -0,062 | 0       | 0,069771 | -0,02  | -0,061 | 0,003   | 0,064265 | -0,02  | -0,048 | -0,005  | 0,05224  | -0,011 | -0,039 | -0,003  | 0,040632 |
| 46     | 120  | 0 | 0 | 0    | -0,045 | -0,066 | 0,006   | 0,080106 | -0,031 | -0,065 | 0,004   | 0,072125 | -0,021 | -0,059 | 0,007   | 0,063016 | -0,021 | -0,053 | 0,002   | 0,057044 | -0,01  | -0,039 | 0,002   | 0,040311 |
| 47     | 160  | 0 | 0 | 0    | -0,043 | -0,07  | 0,007   | 0,08245  | -0,025 | -0,065 | 0,002   | 0,060869 | -0,019 | -0,071 | 0,008   | 0,073932 | -0,02  | -0,054 | -0,006  | 0,057896 | -0,01  | -0,041 | -0,003  | 0,042308 |
| 48     | 200  | 0 | 0 | 0    | -0,042 | -0,063 | 0,005   | 0,075881 | -0,027 | -0,065 | 0,005   | 0,070562 | -0,017 | -0,06  | 0,003   | 0,062434 | -0,02  | -0,05  | -0,002  | 0,053889 | -0,01  | -0,038 | -0,003  | 0,039961 |
|        |      |   |   |      |        |        |         |          |        |        |         |          |        |        |         |          |        |        |         |          |        |        |         |          |

## 16.6 PŘÍLOHA ČÍSLO 6 – CHOVÁNÍ ODCHYLKY DELTA57

V následujícím obrázku je zobrazena závislost všech odchylek DX57, DY57, DZ57 a DELTA57 na pořadí v sestavené tabulce.

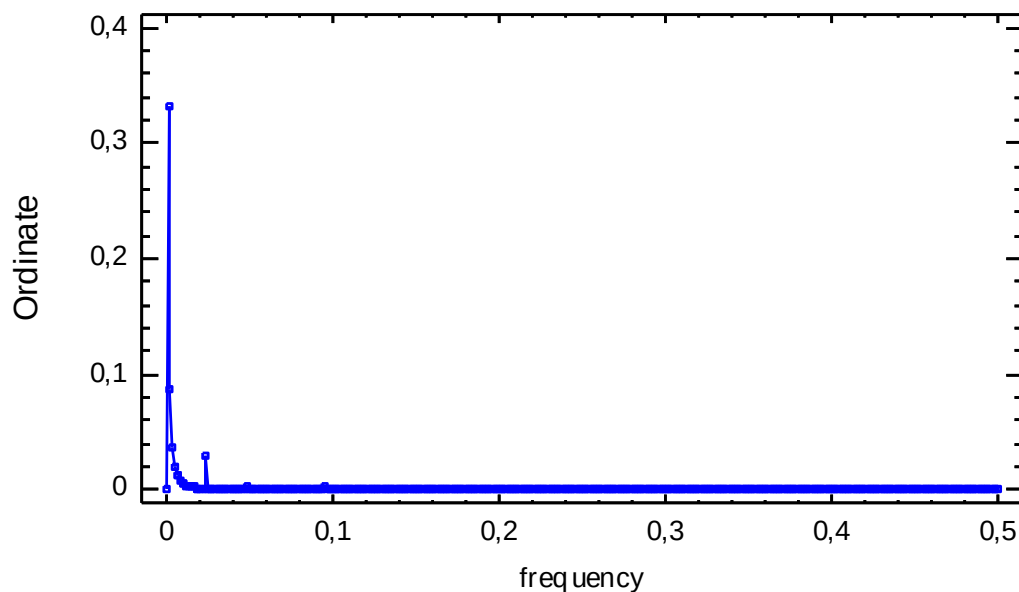


Jako další byla testována periodicitu sledované veličiny DELTA57. Výsledky ukazují na periodu o nízké frekvenci, tj. do cca. 80 vzorků. Tzn., že chyby se opakují v krátkých intervalech z celkového souboru dat o 840 hodnotách. Následující grafy tuto teorii potvrzují.

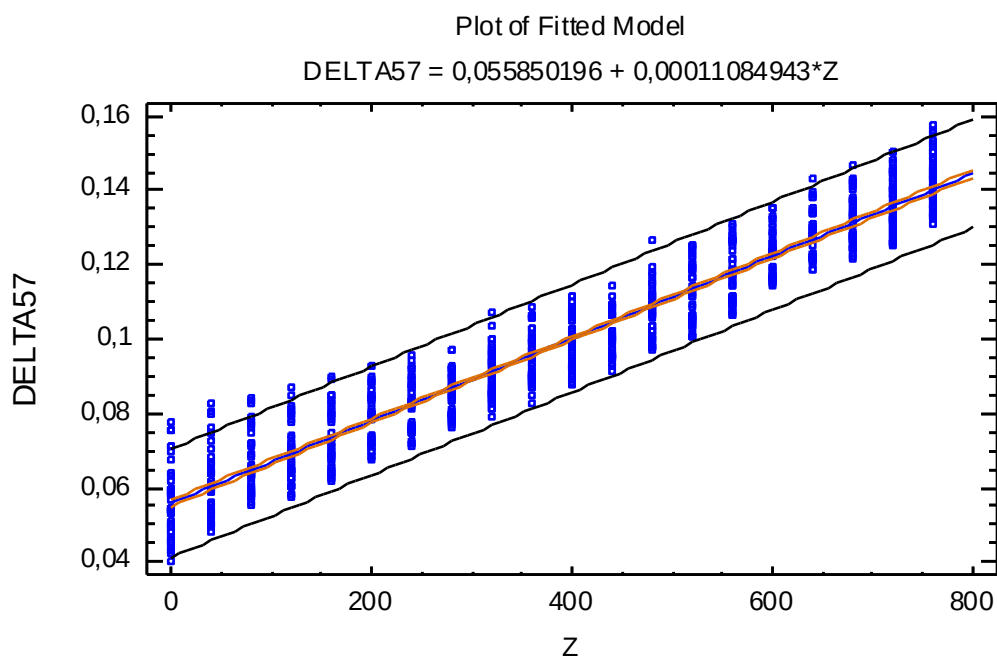




Periodogram for DELTA57

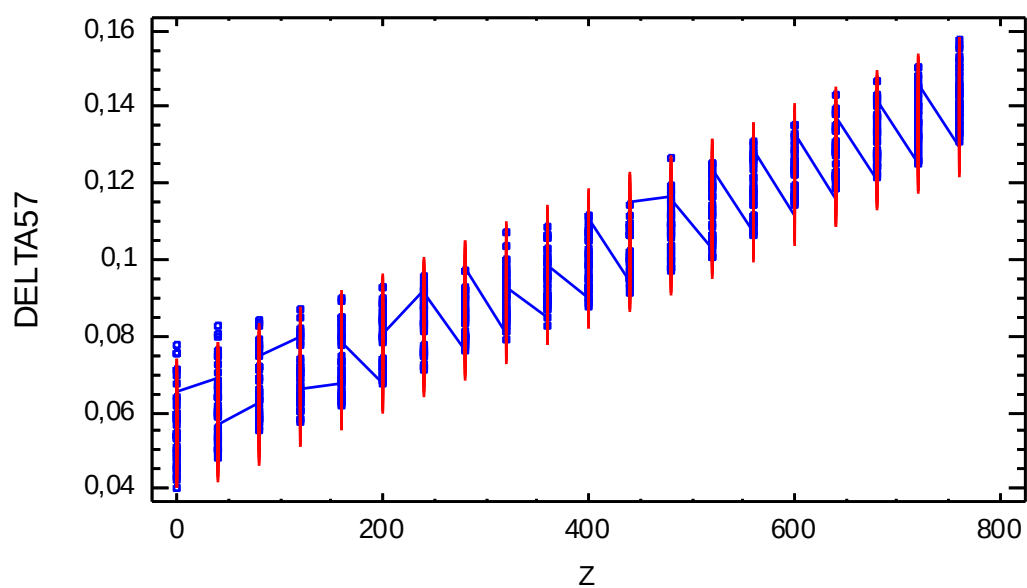


Dalším pozorovaným parametrem byla zvolena odchylka DELTA57 na poloze smykadla Z. Na grafu je vidět závislost odchylky DELTA57 na poloze smykadla vyjádřenou rovnicí:  $DELTA57 = 0,055850196 + 0,00011084943 * Z$  a rozptylem při nejistotě 95%.

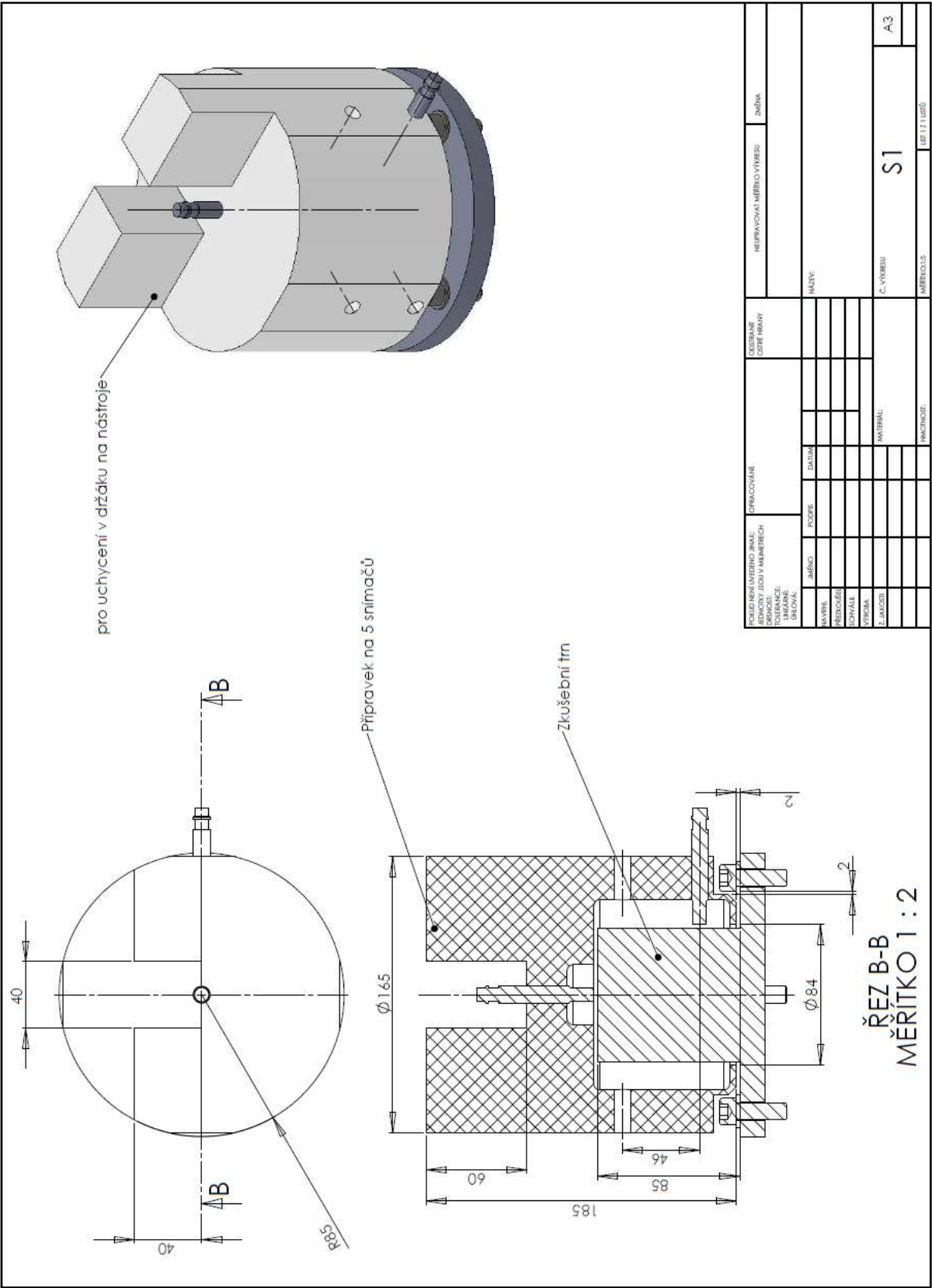


Poslední graf vyjadřuje měřené hodnoty DELTA57 opět na výsuvu smykadla (osy Z). Z grafu je možné predikovat chování souboru DELTA57 na výsuvu smykadla (Z).

Plot of DELTA57 with Predicted Values

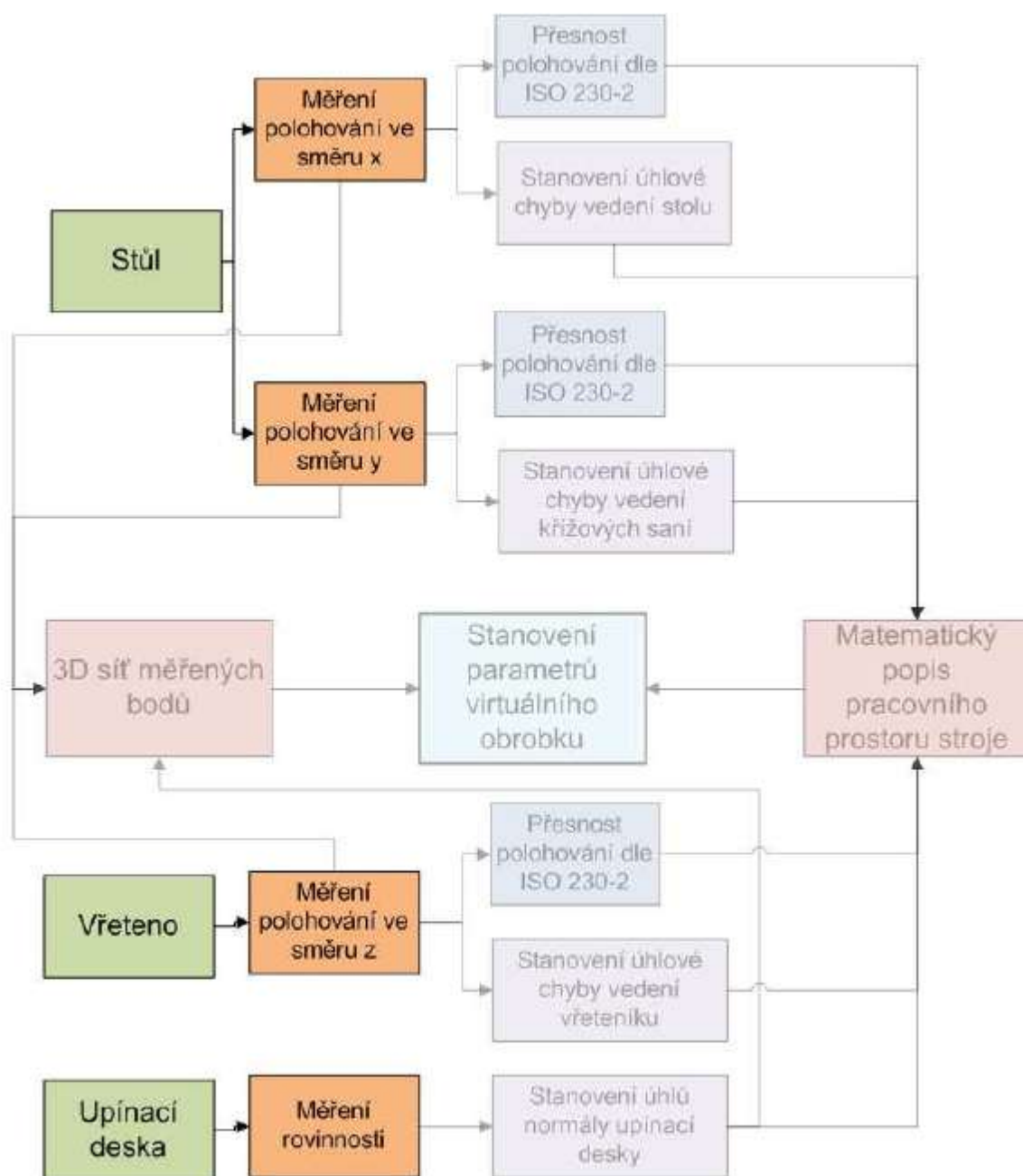


16.7 PŘÍLOHA ČÍSLO 7 - DRŽÁK IN\_081

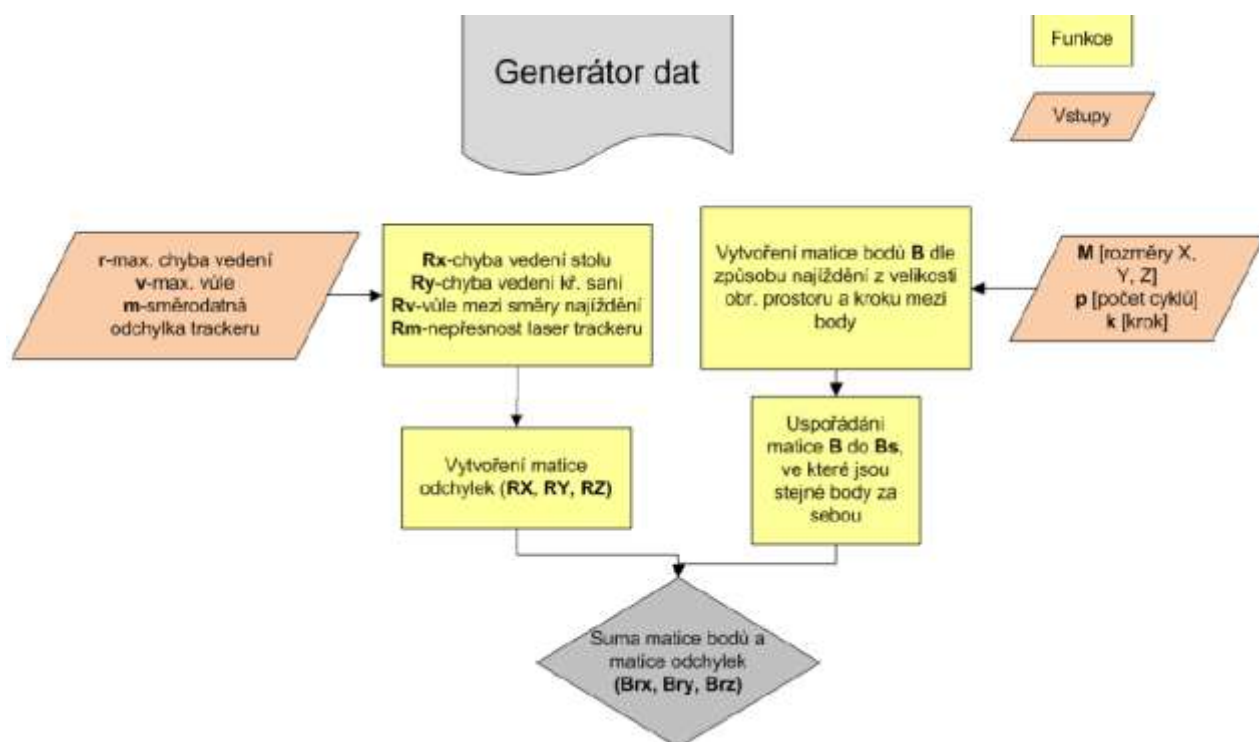


## 16.8 PŘÍLOHA ČÍSLO 8 - VÝSLEDKY DIPLOMOVÉ PRÁCE

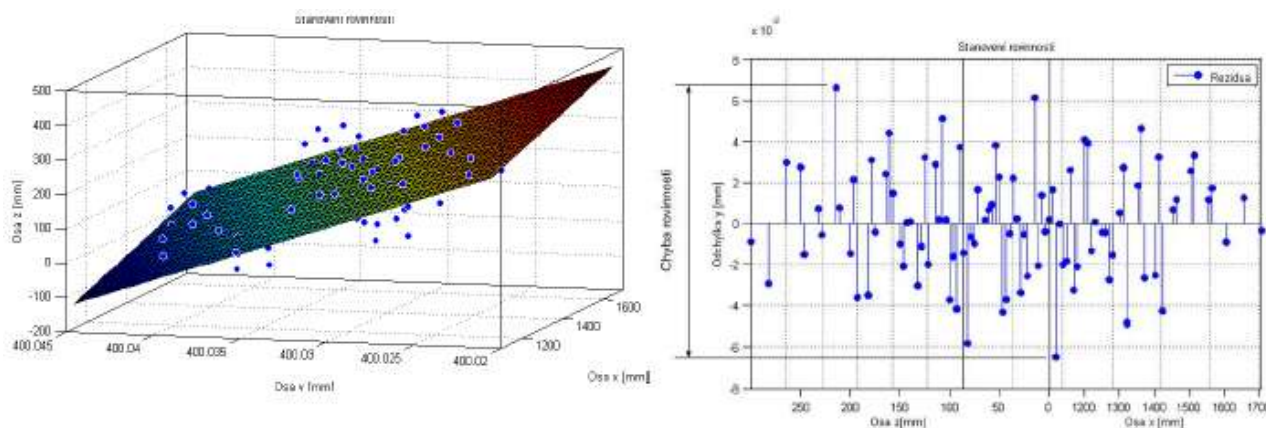
Sestavený přístup k popisu chyb v pracovním prostoru tříosé frézky využívající přístroj Laser Tracker od fy. API. Práce byla zaměřena na predikování vlastností obrobení obrobku.



Vzhledem k přístupnosti a rozsahu diplomové práce byly využity náhodně generovaná dat, která byly podloženy skutečným měřením.



Na následujícím obrázku je znázorněn popis vztažní roviny definované naměřenými hodnotami, ze kterých je možné identifikovat chybu rovinnosti a kolmosti.



## 16.9 PŘÍLOHA ČÍSLO 9 – DOKUMENTACE Z MĚŘENÍ SVISLÉHO SOUSTRUHU



Měření translačních os svislého soustruhu pomocí Laserinterferometru (Renishaw) a Laser Tracker (API) v TOSHULIN.



Měření svislého soustruhu Laser Trackerem (API) v TOSHULIN.

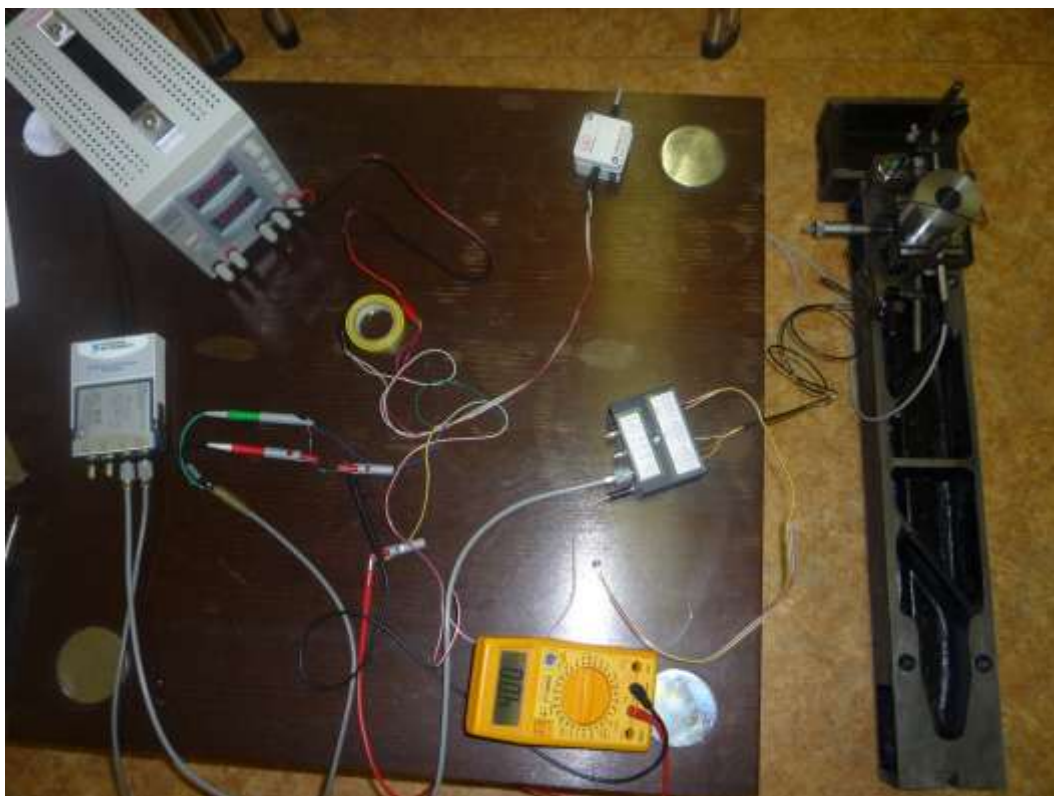




Měření přesnosti chodu rotační desky svislého soustruhu bez zatížení navrženou aparaturou (FSI, UVSSR) v TOSHULIN.



Měření přesnosti chodu rotační desky svislého soustruhu zatíženou prstencem navrženou aparaturou (FSI, UVSSR) v TOSHULIN.



Testování jednotky pro zpracování signálu a kalibrace bezkontaktních snímačů na FSI, UVSSR.



Testování navržené jednotky na konzolové frézce FNG32 v dílnách FSI, UVSSR.





Detail zkoušek měřící aparatury.

**16.10 PŘÍLOHA ČÍSLO 10 – ŽIVOTOPIS****Osobní informace**

|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| Jméno / Příjmení   | Ing., Dipl.-Ing. Michal Holub |
| Adresa             | Čejkovická 13, 628 00, Brno   |
| Telefon            | +420 725 506 119              |
| E-mail             | holub@fme.vutbr.cz            |
| Státní příslušnost | Česká Republika               |
| Datum narození     | 31. 7. 1982                   |

**Vzdělání a odborná příprava**

|                        |                                                                                                                                                                   |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Období                 | 1. 3. 2009 - 30. 6. 2009                                                                                                                                          |
| Název a typ organizace | Technische Universität Graz, Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften, Institut für Fertigungstechnik, Kopernikusgasse 24, A-8010 Graz, Österreich |
| Úroveň vzdělání        | Studijně – pracovní stáž, přesnost obráběcích strojů                                                                                                              |

|                        |                                                                                    |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Období                 | 2007 - doposud                                                                     |
| Název a typ organizace | Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, obor Stavba výrobních strojů a zařízení |
| Úroveň vzdělání        | Doktorské studium                                                                  |

|                        |                                                                                                                                                        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Období                 | 2001 - 2007                                                                                                                                            |
| Název a typ organizace | Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Obor Stavba výrobních strojů a zařízení, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká Republika. |
| Úroveň vzdělání        | Diplomová práce: Entwicklung einer Technologie und einer Anlage zum kontinuierlichen Abtragschleifen von Draht                                         |

|                        |                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Období                 | 2005 - 2007                                                                                                                                                                                                                           |
| Název a typ organizace | Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Professur für Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz, Germany |
| Úroveň vzdělání        | Diplomová práce: Entwicklung einer Technologie und einer Anlage zum kontinuierlichen Abtragschleifen von Draht                                                                                                                        |

|                        |                                                                                      |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Období                 | 1997 - 2001                                                                          |
| Název a typ organizace | Střední průmyslová škola strojnická a Vyšší odborná škola technická Brno, Sokolská 1 |
| Úroveň vzdělání        | Maturitní zkouška (obor Všeobecné strojírenství)                                     |

### **Pracovní zkušenosti**

|                      |                                                                                                                                       |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Období               | 31. 08. 2011 - doposud                                                                                                                |
| Vykonávaná funkce    | Asistent                                                                                                                              |
| Název zaměstnavatele | Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, ÚVSSR-odbor výrobních strojů, Technická 2896/2, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika |
| Pracovní poměr       | Práce na částečný úvazek                                                                                                              |

|                      |                                                                                                                                       |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Období               | 25. 3. 2008 – 31. 8. 2011                                                                                                             |
| Vykonávaná funkce    | Asistent                                                                                                                              |
| Název zaměstnavatele | Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, ÚVSSR-odbor výrobních strojů, Technická 2896/2, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika |
| Pracovní poměr       | Práce na plný úvazek                                                                                                                  |

|                      |                                                                                                                                                |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Období               | 1. 2. 2008 – 25. 3. 2008                                                                                                                       |
| Vykonávaná funkce    | Tech. hosp. pracovník                                                                                                                          |
| Název zaměstnavatele | Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně,<br>ÚVSSR-odbor výrobních strojů, Technická<br>2896/2, Královo Pole, 61600, Brno, Česká<br>republika |
| Pracovní poměr       | Práce na částečný úvazek                                                                                                                       |
| Období               | 15. 12. 2007 – 31. 08. 2011 (doposud)                                                                                                          |
| Vykonávaná funkce    | Živnostenský list – Příprava a vypracování<br>technických návrhů                                                                               |
| Název zaměstnavatele | -                                                                                                                                              |
| Pracovní poměr       | Hlavní pracovní činnost (vedlejší pracovní<br>činnost)                                                                                         |
| Období               | 1. 6. 2006 – 30. 5. 2007                                                                                                                       |
| Vykonávaná funkce    | Konstrukce - řešení diplomové práce                                                                                                            |
| Název zaměstnavatele | KIESELSTEIN GmbH, Erzbergerstraße 3,<br>09116 Chemnitz, Německo                                                                                |
| Pracovní poměr       | Praxe                                                                                                                                          |