



**FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

Metodika měření obecných prostorových ploch

Procedure of the measurement of the common surfaces

Disertační práce

Autor práce: Ing. Radek Lehner
Školitel práce: doc. Ing. Helena Zídková Ph.D.
Konzultant specialista: doc. Dr. Rer. nat. Ing. Jan Valdman

Plzeň 2024

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

Metodika měření obecných prostorových ploch

vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Především děkuji mé školitelce doc. Ing. Heleně Zídkové, Ph.D., dále pak konzultantům doc. dr. rer. nat. Ing. Janu Valdmanovi a Ing. Zdeňku Pospěchovi, Ph.D. za vedení a za věcné připomínky v průběhu celého studia, a především pak při zpracování této disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat kolegům z firem ŠMT a.s., Enercon GmbH a Alstom Power LLC, kteří mi během studia a řešení této disertační práce poskytovali rady a odbornou pomoc.

Poděkování také patří mé přítelkyni a dceři, mým rodičům, mému bratrovi a všem známým, bez jejichž podpory bych nemohl tuto práci dokončit.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Lehner	Jméno Radek
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Zídková PhD.	Jméno Helena
PRACOVIŠTĚ VEDOUCÍHO	Katedra technologie obrábění, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni	
DRUH PRÁCE	Disertační	
NÁZEV PRÁCE	Metodika měření obecných prostorových ploch	

Fakulta: Strojní
Katedra: Katedra technologie obrábění
Rok odevzdání: 2024

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	129	Textová část	84	Grafická část	0
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Práce se zabývá popisem obrobkových sond, jejich použitím v praxi a popisem kalibrace sondy Renishaw RMP 60 na těžkých obráběcích strojích Škoda, vytvořením jednotného kalibračního cyklu, který by byl využitelný pro stroje HCW se všemi dostupnými konfiguracemi.
KLÍČOVÁ SLOVA	Měření, Renishaw RMP60, kalibrační cyklus

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of Degrees) Ing. Lehner	Name Radek
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Zídková PhD.	Name Helena
INSTITUTION	Department of machining technology, Faculty of Mechanical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen	
TYPE OF WORK	Dissertation	
TITLE OF THE WORK	Procedure of the measurement of the common surfaces	

Faculty: Faculty of Mechanical Engineering
 Department: Department of Machining Technology
 Submitted in: 2024

Number of pages (A4 a eq. A4)

Totally	129	Text part	84	Graphical part	0
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with workpiece measuring probes, their application in industrial practice, and a description of the calibration of a Renishaw RMP60 probe used on heavy machine tools manufactured by Škoda. It goes on to describe the creation of a single calibration cycle which can be used for Škoda's HCW series of machines with all type of configurations.
KEY WORDS	Measuring, Renishaw RMP 60 measuring probe, calibration cycle

KURZFASSUNG

AUTOR	Nachname Ing. Lehner	Name Radek
STUDIENFACH		
BETREUER	Nachname doc. Ing. Zídková PhD.	Name Helena
INSTITUTION	Katheder der Bearbeitungstechnologie, Fakultät für Maschinenbau, Westböhmisches Universität in Pilsen	
ART DER ARBEIT	Dissertation	
TITEL	Methodik der Vermessung von allgemeinen Flächen im Raum	

Fakultät: Fakultät für Maschinenbau
Katheder: Katheder der Bearbeitungstechnologie
Abgabe: 2024

ANZAHL VON SEITEN (A4 a eq. A4)

Total	129	Text Teile	84	Grafik	0
--------------	-----	-------------------	----	---------------	---

KURZBESCHREIBUNG	Die Dissertationsarbeit befasst sich über Beschreibung von den Werkstück-Messtastern, über Anwendungen in Praxis und Beschreibung der Kalibrierung des Messtasters Renishaw RMP 60 an den Groß-Werkzeugmaschinen Škoda, Herausbildung von vereinigttem Kalibrierungszyklus, der für alle Konfigurationen der HCW Maschinen benutzbar wäre.
SCHLÜSSELWÖRTER	Vermessung, Renishaw RMP 60, Zyklus für die Kalibration

OBSAH

Prohlášení o autorství	2
Poděkování.....	3
Anotace	4
Summary	5
Kurzfassung	6
Obsah.....	7
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Seznam zkratk a pojmů	11
1. Úvod.....	14
2. Cíle disertační práce	15
3. Teoreticko-metodologická a analytická část	16
3.1 Rozbor současného stavu.....	16
3.1.1 Princip obrobkových sond.....	17
3.1.2 Doteky obrobkových sond	18
3.1.2.1 Materiál dřívku.....	19
3.1.2.2 Materiál kuličky	19
3.1.2.3 Tvar doteků	20
3.2 Software pro obrobkové sondy.....	22
3.3 Možnosti různých řídicích systémů	25
3.3.1 Siemens	26
3.3.2 Heidenhain	27
3.3.3 Fanuc	29
3.3.4 Shrnutí ŘS	29
3.4 Výrobci obrobkových sond.....	30
3.4.1 Shrnutí výrobců sond	30
3.5 Současný stav problematiky kalibrace sond a měření v obecných rovinách.....	31
4. Použití obrobkových sond	33
4.1. Popis praktické aplikace – očekávání.....	34
4.2. Hledání vhodné aplikace – proč nefungují zažité metody	36

4.3. Nalezení vhodné kalibrační metody.....	40
4.3.1 Popis kalibračního cyklu PROBE_CALIB.....	43
4.4. Kalibrace kinematických parametrů pro technologická příslušenství	48
4.4.1 Popis cyklu HEAD_CALIB	49
4.5. Měření neúplného kruhu	52
4.6. Měření pomocí obrobkových sond v obecné rovině	55
4.6.1 Souřadný systém obrobku je přizpůsoben souřadnému systému stroje	55
4.6.2 Souřadný systém stroje je přizpůsoben souřadnému systému obrobku	56
4.6.3 Přepočítání transformací	58
4.6.4 Popis cyklu pro přepočítání transformací	75
5. Metodika měření	77
6. Závěr	80
6.1. Přínosy pro vědecké poznání	80
6.2. Přínosy pro praxi	80
6.3. Návrh dalšího výzkumu	81
Citovaná literatura	82
Seznam publikovaných prací.....	84
Seznam příloh.....	85

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Dotek obrobkové sondy	19
Obr. 2 – Přímý dotek	20
Obr. 3 – Hvězdicový dotek	21
Obr. 4 – Diskový dotek	21
Obr. 5 – Válcový dotek	22
Obr. 6 – Dotek se špičkou a dutou kuličkou	22
Obr. 7 – Měření hrany v jednom bodě	23
Obr. 8 – Měření hrany ve dvou bodech	23
Obr. 9 – Měření otvoru, hřídele, drážky	24
Obr. 10 – Měření rohu	24
Obr. 11 – Měření roviny	25
Obr. 12 – Měření koule	25
Obr. 13 – Kalibrace efektivní délky	28
Obr. 14 – Kalibrace efektivního poloměru	28
Obr. 15 – Stroj HCW3 – 250 Nc s polohovadlem IOV 350	33
Obr. 16 – Rozložení a směr os IOV	34
Obr. 17 – Měření příruby rotoru pomocí obrobkové sondy v hlavě IFVW103	37
Obr. 18 – Spínací bod	41
Obr. 19 – Kalibrační stojánek	41
Obr. 20 – Postup vývoje cyklu PROBE_CALIB	43
Obr. 21 – Návrh kloubového mechanismu	44
Obr. 22 – Příklad vyvolání cyklu PROBE_CALIB	47
Obr. 23 – Kinematické parametry v masce Cycle800	49
Obr. 24 – Schéma měření	49
Obr. 25 – Měření válce	52
Obr. 26 – Kontaktní bod při měření válce	53
Obr. 27 – Vývojový diagram	54
Obr. 28 – Obrábění rotoru plynové turbíny	56
Obr. 29 – Obrábění příruby lopatky větrné turbíny	57
Obr. 30 – Pravidlo pravé ruky	58
Obr. 31 – Transformace pomocí posunutí	59
Obr. 32 – Transformace pomocí rotace	60
Obr. 33 – Sestavení jednotlivých rotací	61
Obr. 34 – Způsob složení vzorců	74
Obr. 35 – Nulové body os X_m , Y_m a Z_m	76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Přehled parametrů sond	30
Tabulka 2 – Ověření přesnosti měření, kalibrace MULTI	36
Tabulka 3 – Ověření přesnosti měření, kalibrace MULTI s krokem 10°	37
Tabulka 4 – Ověření přesnosti měření s krokem 10° a hlavou IFVW103, metoda MULTI	39
Tabulka 5 – Ověření přesnosti měření s krokem 10° a hlavou IFVW103, metoda MONO	40
Tabulka 6 – Význam proměnných v cyklu PROBE_CALIB	44
Tabulka 7 – Přehled proměnných parametru _TYPE	45
Tabulka 8 – Kombinace natočení souřadného systému	45
Tabulka 9 – Význam proměnných v cyklu HEAD_CALIB	51
Tabulka 10 – Značení dílčích rotací	66
Tabulka 11 – Permutace vnitřních a vnějších rotací	69
Tabulka 12 – Přehled parametrů CYCLE600	75

SEZNAM ZKRATEK A POJMŮ

α', β', γ'	–	Vnitřní úhly rotace
α, β, γ	–	Vnější úhly rotace
δ	–	Ohraničení oblasti měření neúplného kruhu
A_{11}, A_{12}, A_{13}	–	Prvky matice na prvním řádku
A_{21}, A_{22}, A_{33}	–	Prvky matice na druhém řádku
A_{31}, A_{32}, A_{33}	–	Prvky matice na třetím řádku
A_X, A_Y, A_Z	–	Složky bodu A v osách X, Y a Z
B_X, B_Y, B_Z	–	Složky bodu B v osách X, Y a Z
$I1_X, I1_Y, I1_Z$	–	Vektor v kompenzační tabulce pro CYCLE800
$I1_X, I1_Y$	–	Vektor v kompenzační tabulce pro CYCLE800
$I3_{Za}, I3_{Zb}, I3_{Zc}$	–	Vektor v kompenzační tabulce pro CYCLE800
c_1, c_2, c_3	–	Označení funkce kosinus pro matici 1, 2 a 3
s_1, s_2, s_3	–	Označení funkce sinus pro matici 1, 2 a 3
AA	–	Typ baterie
Arcsin	–	Funkce arkussinus
Atan	–	Funkce arkustangens
AUT	–	Automatic – automatický režim v řídicím systému SINUMERIK
CAD/CAM	–	Computer Aided Design / Computer Aided Manufacture – počítačem podporovaný design / počítačem podporovaná výroba
CMM	–	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
CNC	–	Computer Numerical Control – počítačem řízený obráběcí stroj
CYCLE800	–	Cyklus firmy SIEMENS určený pro natočení souřadného systému
det	–	Determinant matice
FCW	–	Horizontální frézovací stroj (interní označení v ŠMT)
FZ42	–	Portálový frézovací stroj Zimmerman
GE	–	General Electric Company – nadnárodní konglomerát firem z USA
GUD	–	Global User Data – globální uživatelské proměnné
HCW, HCW3	–	Horizontální frézovací stroj (interní označení v ŠMT)
HSC	–	High Speed Cutting – vysokorychlostní řezání
HSM	–	High Speed Machining – vysokorychlostní obrábění
HW	–	Hardware
IFVW103	–	Frézovací úhlová hlava s jednou osou rotace (interní označení v ŠMT)
IOV, IOV350	–	Zařízení určené k upínání a natáčení rotorů (interní označení v ŠMT)
IP68, IPX8	–	Stupeň ochrany zařízení před působením vody
JOG	–	Ruční režim v řídicím systému SINUMERIK
Kg	–	Kilogram - základní jednotka hmotnosti
KTO	–	Katedra Technologie Obrábění
MCS	–	Machine Coordinate System – souřadný systém stroje
MDA	–	Manual Data Automatic – poloautomatický režim v řídicím systému
mm	–	Milimetr - jednotka délky

N	–	Newton – jednotka síly
$n \times n$	–	Obecný rozměr matice o n řádcích a n sloupcích
NB	–	Nulový bod
Pc	–	Celková matice posunutí
PC	–	Personall Computer – osobní počítač
PLC	–	Programmable Logic Controller – programovatelný automat, který pomocí programu řídí činnost procesů
PNB	–	Posunutí nulového bodu
R_c	–	Celková vnější rotační matice
R'_c	–	Celková vnitřní rotační matice
R_X	–	Vnější rotační matice pro osu X
R_Y	–	Vnější rotační matice pro osu Y
R_Z	–	Vnější rotační matice pro osu Z
R'_X	–	Vnitřní rotační matice pro osu X
R'_Y	–	Vnitřní rotační matice pro osu Y
R'_Z	–	Vnitřní rotační matice pro osu Z
R_{XYZ}	–	Celková vnější rotační matice složená z jednotlivých matic R_X, R_Y, R_Z
R_{XZY}	–	Celková vnější rotační matice složená z jednotlivých matic R_X, R_Z, R_Y
R_{YZX}	–	Celková vnější rotační matice složená z jednotlivých matic R_Y, R_Z, R_X
R_{YXZ}	–	Celková vnější rotační matice složená z jednotlivých matic R_Y, R_X, R_Z
R_{ZXY}	–	Celková vnější rotační matice složená z jednotlivých matic R_Z, R_X, R_Y
R_{ZYX}	–	Celková vnější rotační matice složená z jednotlivých matic R_Z, R_Y, R_X
R'_{XYZ}	–	Celková vnitřní rotační matice složená z jednotlivých matic R'_X, R'_Y, R'_Z
R'_{XZY}	–	Celková vnitřní rotační matice složená z jednotlivých matic R'_X, R'_Z, R'_Y
R'_{YZX}	–	Celková vnitřní rotační matice složená z jednotlivých matic R'_Y, R'_Z, R'_X
R'_{YXZ}	–	Celková vnitřní rotační matice složená z jednotlivých matic R'_Y, R'_X, R'_Z
R'_{ZXY}	–	Celková vnitřní rotační matice složená z jednotlivých matic R'_Z, R'_X, R'_Y
R'_{ZYX}	–	Celková vnitřní rotační matice složená z jednotlivých matic R'_Z, R'_Y, R'_X
ŘS	–	Řídicí systém
$\text{sgn}(\sigma)$	–	Signum – funkce znaménka permutace
SKEW	–	Vyosení středu sondy vlivem prohnutého dřívku
SW	–	Software
ŠMT	–	Bývalá společnost ŠKODA MACHINE TOOL a.s., dnes ŠMT a.s.
Tc	–	Celková transformační matice
TRAORI	–	Cyklus firmy SIEMENS určený pro 5-ti osé obrábění
TZ	–	Technologické zařízení / příslušenství (úhlová frézovací nebo vrtací hlava)
V	–	Volt – jednotka elektrického napětí
V_x, V_y, V_z	–	Složky vektoru posunutí v osách X, Y a Z
WCS	–	Workpiece Coordinate System – souřadný systém obrobku
$X(\alpha)$	–	Vnější rotace okolo osy X o úhel α
$Y(\beta)$	–	Vnější rotace okolo osy Y o úhel β
$Z(\gamma)$	–	Vnější rotace okolo osy Z o úhel γ
$X(\alpha')$	–	Vnitřní rotace okolo osy X o úhel α'
$Y(\beta')$	–	Vnitřní rotace okolo osy Y o úhel β'

$Z(\gamma')$	–	Vnitřní rotace okolo osy Z o úhel γ'
X, Y, Z	–	Geometrické osy
X_m, Y_m, Z_m	–	Strojní osy X, Y a Z
X-Y-Z	–	Permutace otáčení okolo os v pořadí X, poté Y a nakonec Z
X-Z-Y	–	Permutace otáčení okolo os v pořadí X, poté Z a nakonec Y
Z-Y-X	–	Permutace otáčení okolo os v pořadí Z, poté Y a nakonec X
Z-X-Y	–	Permutace otáčení okolo os v pořadí Z, poté X a nakonec Y
Y-Z-X	–	Permutace otáčení okolo os v pořadí Y, poté Z a nakonec X
Y-X-Z	–	Permutace otáčení okolo os v pořadí Y, poté X a nakonec Z
ZČU	–	Západočeská univerzita
σ	–	Permutace čísel $\{1, 2, \dots, n\}$
\emptyset	–	Označení průměru
ΔZ	–	Změna délky
3D	–	Označení pro třírozměrný prostor
3D taster	–	Nespínací měřicí sonda

1. ÚVOD

V úvodu této disertační práce bych si dovilil nastínit, že se ve svém profesním životě zabývám převážně CNC obráběcími stroji, které se postupem času staly zároveň i mojí osobní zálibou, ale i zdrojem obživy. Zvláštní kapitolou jsou těžší obráběcí stroje, případně jejich kombinace ve vysoce specializované a nestandardní komplexní pracoviště. Nedílnou součástí každého takového celku je i příslušenství sloužící k rozměrové kontrole obráběných dílců, bez ohledu na jejich velikost, tvar či stav rozpracovanosti. Ba co více, v dnešní době si již fakticky nelze představit, že by na jakémkoliv pracovišti s moderními obráběcími stroji nebyla možnost aplikovat standardní či speciální měřicí cykly, ať již z důvodu eliminace času, chybného lidského faktoru, či snížení procentuální zmetkovitosti ve výrobním procesu. Ve většině případů pak nalézá mimořádné uplatnění tzv. obrobková sonda.

Dochází k situacím, kdy je snaha uživatelů používat obrobkové sondy podobně jako na malých obráběcích centrech, obzvláště pokud dříve s takovými centry přišli již do kontaktu a realizovali úspěšné procedury měření. V praxi se však na velkých strojích lze setkat s určitým procentem rozporupných výsledků měření, které vedou k důvodným pochybám, zda standardně používané měřicí cykly, datová nastavení a kalibrace, jsou vždy vyhovující či dostatečné. Některá z těchto měření lze kontrolovat i ověřenými konvenčními metodami, což předpoklad o nepřesnostech potvrzuje (např. pomocí držáků s číselníkovými úchylkoměry, dutinoměry, hloubkoměry, mikrometrickými odpichy atd.). Za pomoci kolegů z Katedry technologie obrábění na Západočeské univerzitě (dále jen KTO a ZČU) a kolegů z praxe, jsem měl možnost získat zkušenosti s problematikou měření i na malých obráběcích strojích, CNC obráběcích centrech, kde tato problematika nedosahuje zdaleka takové četnosti a rozsahu, a proto příčiny bude nutné hledat ve strojích a procedurách měření, provést podrobnější analýzu dat geometrické přesnosti strojů, výměnného technologického příslušenství, jakožto i kinematických řetězců a jejich hodnot. Praxí je empiricky dokázáno a ověřeno, že žádný rozměrově větší obráběcí stroj není geometricky dokonalý, časově stálý, a to ani pokud je zcela nový (zvláštním případem je téma teplotní stability stroje a možností kompenzací). Montáží a uvedením do provozu nových CNC strojů, kde mimo nových softwarových verzí a updatů řídicích systémů jsou průběžně nasazovány i aktuálně dostupné, nastavené a vyzkoušené starší SW verze. Při použití na těchto ověřených systémech se poté příčina problematiky posunuje právě na sondy a s nimi související záležitosti.

Z hlediska světového poznání lze konstatovat, že v odborných impaktovaných periodikách, v technické dokumentaci, v internetových médiích, jakož i v amatérských diskuzích lze najít různé odborné i neobdobné názory. Ve většině případů se však lze dočíst, jakým úžasným nástrojem taková obrobková sonda je. Pouhou interpretací dat zde může docházet k mylným názorům, a to především z pohledu, kdy dojde k chybnému proměření např. nákladově i termínově složitého obrobku a při případném dokončování na finální rozměry tak mohou vzniknout neopravitelná pochybení, jež mají za následek fatální škody.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této disertační práce je vytvořit ucelený pohled na problematiku měření pomocí obrobkových sond, zejména v případě použití na těžkém obráběcím stroji. Popsat hlavní problémy a nedostatky při jejich používání ve spojitosti se standardně dodávanými měřicími cykly. Zjistit vlivy související s užitým řídicím systémem (dále jen ŘS), tj. zda výsledky ovlivňuje naprogramovaná metodika kalibrování i samotného měření u nejčastěji používaných ŘS, jako jsou od výrobců Siemens, Heidenhain, Fanuc versus uživatelem individuálně vytvořené cykly a programy. Dále pak prověřit a rozlišit standardní cykly výrobce řídicího systému, výrobce stroje a výrobce měřicí sondy.

Existuje tedy důvodné podezření, že pokud je více dodavatelů – tvůrců zdánlivě totožného kalibračního cyklu, jednotlivé výsledky se pravděpodobně budou lišit a nemusí tak být vždy optimální pro použití s konkrétními měřicími cykly. Hlubší studium v této oblasti by mělo stanovit, zda výše zmíněné opravdu samo o sobě ovlivňuje konečné výsledky měření, nebo zda je součástí neurčitě popsaného řetězce stroj – řídicí systém – uživatel – sonda. Pokud bude toto bádání vykazovat znaky vedoucí ke zhoršeným výsledkům měření, tak determinovat příčiny, a na základě toho nastínit buď optimalizaci metodiky, nebo udělat úpravy tam, kde je ze strany výrobců nabízeno jejich dosavadní řešení. Nelze opomenout, že pro specializované či nestandardní případy měření s ohledem na požadované přesnosti a hodnoty proměřovaných součástí – obrobků, budou tato vyžadovat vysoce individuální přístup, jenž nelze běžně dostupnými metodami a prostředky zajistit.

Tato disertační práce se bude zabývat výzkumem výše zmíněné problematiky, jakožto i nalezením vhodného řešení za účelem spolehlivého a opakovatelného získání nejpřesnějších výsledků. Je vysoce pravděpodobné, že cílem bude vytvoření zcela nového kalibračního cyklu včetně jeho srozumitelného popisu. Zmiňované a zkoumané způsoby jsou ověřovány v praxi na víceosých horizontálních frézovacích, vyvrtávacích i portálových strojích a na soustruzích, často v mezinárodním prostředí u stálých zákazníků firmy ŠMT a.s., např. Alstom Power (převzato skupinou GE), Enercon GmbH, Siemens AG, Amersfoort b.v., Něvský závod a další. V případě úspěšného univerzálního odladění a nasazení cyklu včetně podcyklů, budou tyto následně poskytnuty odborné i laické veřejnosti ke konstruktivní kritice.

V navazující části se tato disertační práce bude zabývat výzkumem metodiky měření obrobků v obecně naklopených či posunutých rovinách a nutnými matematickými vztahy pro přepočet takových transformací. Pokud se podaří pro všechny transformace vyvinout a v praxi otestovat jednotný a ucelený cyklus, bude pravděpodobně také poskytnut veřejnosti.

3. TEORETICKO-METODOLOGICKÁ A ANALYTICKÁ ČÁST

3.1 Rozbor současného stavu

V každé moderní strojírenské firmě jsou kladeny požadavky na dosažení maximální hospodárnosti výroby a zároveň na dosažení co nejvyšší produktivity práce. Každá společnost proto klade nejvyšší priority na to, aby se za co nejkratší čas podařilo na daném obráběcím stroji obrobít co nejvíce obrobků, a tedy utržit co nejvíce peněz. Důležitým kritériem by přitom měla být i dosažená přesnost výroby, jelikož takto obrobené kusy by měly zároveň i odpovídat předepsaným tolerancím z výkresové dokumentace, případně odpovídat specifikacím v kupní smlouvě.

Během obrábění vznikají velké řezné a odstředivé síly, a proto na výslednou přesnost obrobku má vliv jeho upnutí a ustavení během celého obráběcího procesu. To by mělo být tuhé a zároveň by nemělo dovolit posunutí nebo deformaci daného obrobku vůči obráběcímu stroji. S neustále se zvyšujícími nároky na produktivitu práce se vyžaduje, aby upnutí a ustavení bylo co nejjednodušší a s ohledem na náklady co nejrychlejší.

Pokud je daný obrobek na obráběcím stroji řádně upnutý a ustavený, je důležité správně zaměřit jeho nulové body (dále jen NB). NB volí zpravidla technolog a do tohoto bodu se přesouvá počátek souřadného systému obrobku (dále jen WCS). K zaměření NB na obráběcích strojích se používají různé metody:

- pomocí nástroje – nulový bod je zaměřen pomocí kontaktu nástroje známé délky s obrobkem. Pokud je vyžadováno nepoškození povrchu daného obrobku, je možno mezi obrobek a nástroj vložit jiný materiál, avšak také o známé tloušťce (zpravidla koncovou měrkou)
- pomocí číselníkového úchylkoměru – číselníkový úchylkoměr bývá uchycen v magnetickém stojánku na čele vřetene, případně pinoly a pomocí pojezdu os stroje lze odečíst hodnoty NB, nebo srovnat obráběný kus paralelně s osami obráběcího stroje
- pomocí nespínacích sond (3D tester) – obdobná metoda jako pomocí úchylkoměru, rozdíl je v tom, že 3D tester je upnut jako nástroj známé délky v pracovním vřetenu stroje
- pomocí spínacích obrobkových sond – v pracovním vřetenu stroje je založena obrobková sonda, která při kontaktu s obrobkem snímá naměřené pozice, a pomocí příslušného měřicího cyklu se dopočítávají NB

3.1.1 Princip obrobkových sond

Obrobková sonda funguje jako spínací měřicí čidlo – během měření rozměrů je upnuté jako nástroj ve vřetenu stroje, přisouvá se k ustavenému obrobku a při kontaktu s obrobkem dojde k vychýlení měřicího doteku. Při vychýlení posílá sonda do PLC stroje signál, který je následně vyhodnocen a dojde k zastavení posuvu. Měřicí čidlo musí tudíž spínat spolehlivě – pokud toto není zaručeno, může dojít ke kolizi stroje, případně sondy s obrobkem. Signál lze přenášet různými způsoby:

- přenos pomocí kabelu
- optický přenos signálu
- přenos radiovým signálem

Přenos signálu pomocí kabelu

Jedná se o nejspolehlivější způsob, jelikož sonda a přijímač nevyžadují přímou viditelnost mezi sebou a zároveň nedochází k rušení signálu např. od dálkových ovladačů jeřábů na dílně. Nevýhodou tohoto způsobu je nutnost “tahat za sebou kabel“, čímž hrozí jeho porušení. (1)
(2)

Optický přenos signálu

Tento způsob funguje na principu přenesení informací pomocí infračerveného světla do řídicí jednotky. Tento systém ale vyžaduje přímou viditelnost mezi sondou a přijímačem, jejich přenosová vzdálenost je max. 6 metrů, čímž je toto řešení vhodné především pro menší stroje. (2)

Přenos radiovým signálem

Tento způsob využívá rádiové vlny k přenesení informací ze sondy do přijímače. Přenos probíhá ve speciálně vyhraněném frekvenčním pásmu, aby nedocházelo k rušení. U tohoto způsobu není vyžadována přímá viditelnost mezi sondou a přijímačem a dosah se pohybuje okolo 15 metrů, proto lze tyto systémy využívat i na velkých portálových obráběcích strojích. (1)

Na trhu je dostupné velké množství nejrůznějších principů spínání, na kterých fungují obrobkové sondy, a každá dodavatelská firma většinou používá své vlastní řešení. Některé principy jsou ale u všech výrobců podobné. Mezi nejběžnější principy, se kterými se lze setkat patří:

- sondy s optickým senzorem
- sondy s kinematicky odporovým senzorem
- sondy s tenzometrickým senzorem

Sondy s optickým senzorem

Tento typ sondy pracuje s jednou LED diodou, ze které vycházejí světelné paprsky následně zaostřené pomocí soustavy čoček. Světelný paprsek dopadá jako světelný bod na diferenciální fotočlánek. Při vychýlení hrotu sondy vytvoří fotočlánek spínací signál. Dotykový hrot je pevně spojen se snímacím talířem a usazen v trojbodovém uložení. Senzor pracuje na bázi bezdotykového optického snímače, což zajišťuje nulové opotřebení, tyto sondy mají dlouhou životnost. (3)

Sondy s kinematickým odporovým senzorem

Hrot sondy je umístěn na tři rovnoměrně rozmístěné válečky, které sedí na šesti kuličkách zajišťujících šestibodový kontakt v kinematickém uložení. Jakmile dojde ke kontaktu doteku sondy s obrobkem, válečky se vzdálí od kuliček, čímž se zmenší velikost styčných ploch a zvýší se elektrický odpor a sonda rozeprve kontakt. (4) (5)

Tenzometrické sondy

Jedná se o velmi přesný druh snímače. Tyto sondy jsou určeny pro náročné aplikace, kde je potřeba zajistit co největší přesnost měření. Využívají technologie křemíkových tenzometrů s přesnou mechanickou konstrukcí. Tenzometry jsou umístěny tak, aby snímaly napětí ve všech osách. Po dosažení prahových hodnot je vytvořen snímací signál. Díky tomu, že snímání je zcela nezávislé na vlastním mechanismu sondy, je zde velmi malá spínací síla, což zajišťuje vysokou opakovatelnost. (4)

3.1.2 Doteky obrobkových sond

Dotek je důležitou součástí každé měřicí sondy, zprostředkovává kontakt mezi měřenou součástí a sondou a způsobuje sepnutí v jejím mechanismu. Dotek se skládá z dříku a z kuličky, viz Obr. 1 – Dotek obrobkové sondy. (5) Nejdůležitějšími vlastnostmi doteků jsou jeho maximální tuhost a dokonalá kulovitost hrotu. Použije-li se dotek s nepřesnou kulovitostí hrotu, nesprávným umístěním kuličky, nepřesným závitem nebo slabou konstrukcí podléhající během měření přílišnému ohybu, může být takto do procesu měření zanesena nepřesnost a zkreslení výsledků. Při volbě doteků platí obecná pravidla: (5)

- volit co nejkratší možnou délku doteku (s ohledem na dané měření), u delších doteků hrozí jejich prohnutí
- omezit nutný počet spojů na minimum (pokud nelze použít dotek požadované délky z jednoho kusu, musí být použit nástavec. Každý nástavec je zdrojem dalších deformací)
- používat co největší možný průměr kuličky hrotu



Obr. 1 – Dotek obrobkové sondy

3.1.2.1 Materiál dříku

Ocel

Stopky doteků vyrobené z nemagnetické nerezové oceli jsou široce využívaným materiálem pro doteky s kuličkou či hrotem s průměrem 2 mm či větším a s délkou do 30 mm. V tomto rozmezí poskytují kompaktní ocelové stopky optimální poměr tuhosti a hmotnosti a také adekvátní průřez kuličky / stopky, aniž by byla snížena tuhost závitovým spojem. (5)

Karbid wolframu

Stopky z karbidu wolframu jsou optimálním řešením pro maximální tuhost a minimální průměr stopky. Tyto parametry jsou vyžadovány u průměru kuličky pod 1 mm nebo pro délky do 50 mm. Problematická je vyšší hmotnost doteku z tohoto materiálu a tím i nebezpečí nižší tuhosti ve spoji u delších doteků. (5)

Keramika

U průměrů kuličky nad 3 mm a při délkách přes 30 mm poskytují keramické stopky tuhost porovnatelnou s ocelí. Jsou však výrazně lehčí než karbid wolframu. Keramické stopky doteků zajišťují také dodatečnou ochranu sondy proti havárii, neboť dotek se v případě kolize zlomí. (5)

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna představují kombinaci optimálních pevnostních charakteristik v podélném směru i v krutu (důležité při hvězdicovém uspořádání) při mimořádně nízké hmotnosti. Materiály z uhlíkových vláken jsou inertní a v kombinaci se speciálními pryskyřicovými matricemi poskytují vynikající ochranu i v nejméně příznivém prostředí pracovního prostoru obráběcího stroje. Materiál je ideálním řešením přinášejícím maximální tuhost a velmi nízkou hmotnost u doteků s délkou nad 50 mm. Jedná se o optimální materiál stopky pro vysoce přesné sondy založené na tenzometrickém principu. Vykazuje vynikající charakteristiku tlumení vibrací a zanedbatelný koeficient teplotní roztažnosti. (5)

3.1.2.2 Materiál kuličky

Rubín

Jedná se o jeden z nejtvrdějších materiálů, syntetický rubín je oxid hlinitý s čistotou 99. Rubínové kuličky mají výjimečně hladký povrch, vynikající pevnost v tlaku a vysokou odolnost

proti mechanickému poškození. Existují však i případy, kdy se nedoporučuje použití rubínové kuličky, a to např. při kontaktu s litinovým nebo hliníkovým povrchem měřeného obrobku, kdy může docházet k opotřebení povrchu kuličky otěrem. (5)

Nitrid křemíku

Jedná se o velmi tvrdý materiál, odolný proti opotřebení, který lze opracovat do velmi přesných kulovitých tvarů. Kulička z nitridu křemíku se nesmí používat při měření obrobků s ocelovým povrchem, kdy dochází k otěru. Naopak u hliníkových povrchů k otěru nedochází. (5)

Oxid zirkoničitý

Oxid zirkoničitý je velmi pevným keramickým materiálem, jehož charakteristiky tvrdosti a opotřebení se přibližují kvalitám rubínu. Díky vlastnostem povrchu je ideálním materiálem pro agresivní aplikace u litinových součástí. (5)

3.1.2.3 Tvar doteků

Na trhu existuje značné množství tvarů doteků a jejich konstrukčních řešení. Za zmínku stojí vyjmenovat alespoň pár základních: (5)

Přímé doteky

Jedná se o nejjednodušší a nejčastěji používaný tvar.



Obr. 2 – Přímý dotek

Hvězdicové doteky

Díky většímu počtu hrotů umožňují tyto konfigurace doteků snímání složitých prvků či otvorů. Systémy se čtyřmi nebo pěti kuličkami jsou pevně přimontovány ke středovému dílci.

Hvězdicové doteky mohou být použity ke snímání nejrůznějších prvků. Použití těchto doteků zkracuje dobu měření, kdy se snímá více hroty a tím se zkracuje dráha pohybu sondy. Jsou tedy vhodné pro měření dutin, drážek atd. (5)



Obr. 3 – Hvězdicový dotek

Diskové doteky

Tyto doteky se používají ke snímání zápchů a drážek v otvorech, kde nelze použít hvězdicový dotek. Diskový dotek je tenký plátek z přesné koule. Doteky jsou k dispozici v mnoha průměrech a tloušťkách. Charakteristickými vlastnostmi je možnost rotačního nastavení kolem osy doteku a dále možnost kombinace disku se středovým dotekem. (5)



Obr. 4 – Diskový dotek

Válcové doteky

Válcové doteky se používají ke snímání otvorů v tenkém plechu. Válcové doteky zakončené kuličkou umožňují kompletní kalibraci a snímání povrchů v osách X, Y i Z. (5)

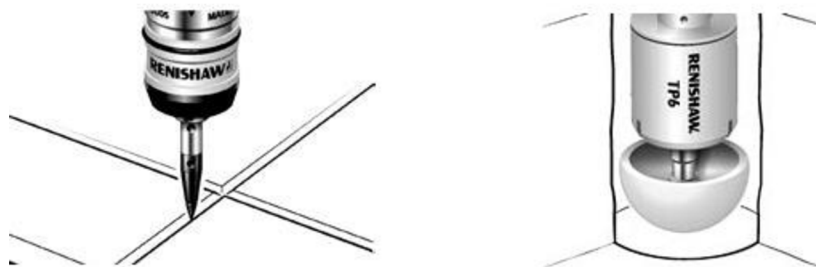


Obr. 5 – Válcový dotek

Špička a dutá kulička

Doteky se špičkou se používají k proměření závitů nebo velmi malých otvorů.

Doteky s dutou keramickou kuličkou jsou ideálním řešením při měření hlubokých otvorů. (5)



Obr. 6 – Dotek se špičkou a dutou kuličkou

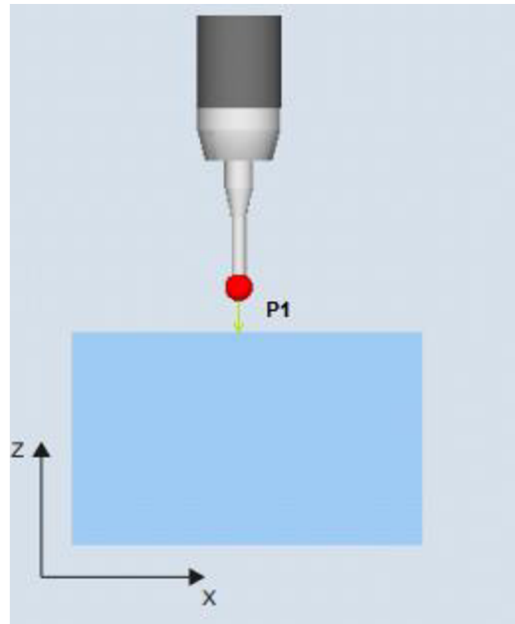
3.2 Software pro obrobkové sondy

Jak již bylo v textu výše zmíněno, principem každé obrobkové sondy je poslat signál o kontaktu sondy s obrobkem do řídicího systému stroje. Vše ostatní je vyhodnocováno a řízeno pomocí měřících cyklů.

Při sepnutí sondy je zaznamenána poloha sepnutí daného bodu, v případě měření ve více bodech je takto zaznamenána množina bodů. Tato poloha je následně porovnávána s teoretickou polohou daného bodu nebo s polohou množin daných teoretických bodů. Rozdílem mezi oběma polohami nebo mezi oběma množinami je zjištěna velikost odchylky nebo odchylek. Téměř všechna měření lze rozdělit na několik následujících elementárních případů.

Měření hrany v jednom bodě

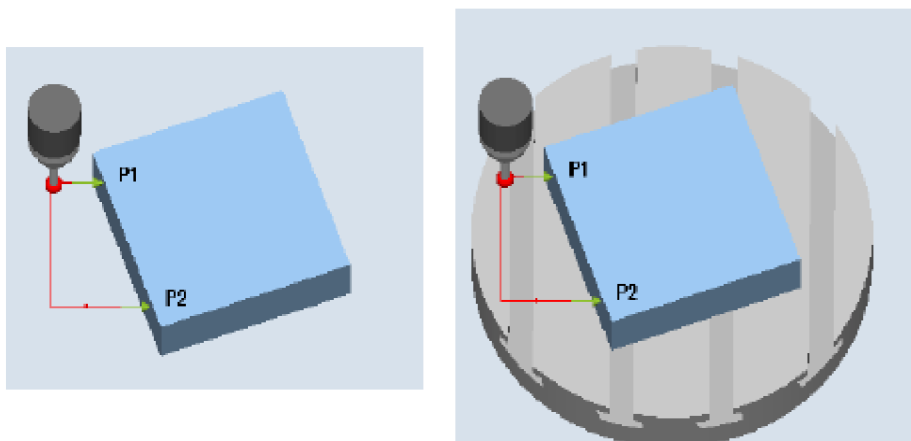
Tímto způsobem měření se zjišťuje rozdíl mezi požadovanou a skutečnou polohou bodu. (6)



Obr. 7 – Měření hrany v jednom bodě

Měření hrany ve dvou bodech

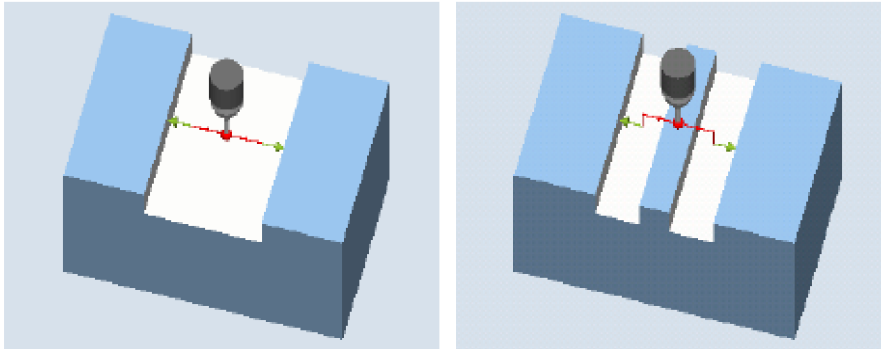
Tímto způsobem se zjišťuje natočení dané hrany vůči souřadným osám stroje. Pomocí měření ve dvou bodech se zjistí jejich rozdíl v dané souřadné ose a vypočte se úhel natočení. Pomocí takto vypočteného úhlu se může provést korekce buď jako otočení souřadného systému okolo jedné z geometrických os nebo, pokud je stroj vybaven otočným stolem, tak provést dorovnění obrobku pomocí stolu. (6)



Obr. 8 – Měření hrany ve dvou bodech

Měření otvoru, hřídele, drážky

Tímto způsobem měření lze zjišťovat polohu středu díry, průměr díry, polohu středu hřídele, průměr hřídele, vzdálenost dvou hran v drážce atd. Cykly jsou si velmi podobné a volbou kombinace vstupních parametrů se rozlišuje varianta měření a způsob vyhodnocení výsledků měření. (6)

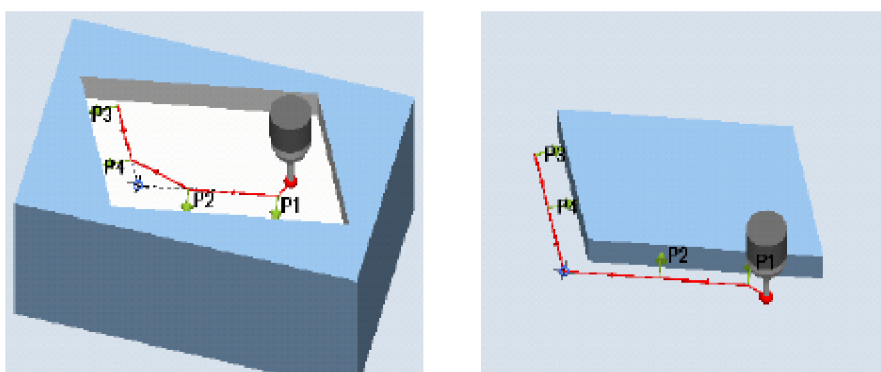


Obr. 9 – Měření otvoru, hřídele, drážky

Měření rohu

Tímto způsobem měření se zjišťuje poloha rohu obrobku, který tvoří průsečík dvou přímek, které představují hrany obrobku. Do takto vypočteného rohu lze nastavit PNB, nebo natočit souřadný systém.

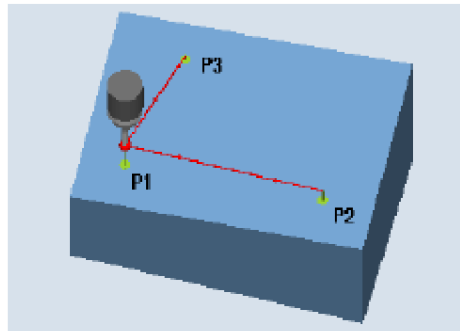
Volbou kombinace vstupních parametrů lze rozlišit, zda se jedná o vnitřní nebo vnější roh, případně zda se jedná o pravoúhlý nebo libovolný roh. (6)



Obr. 10 – Měření rohu

Měření roviny

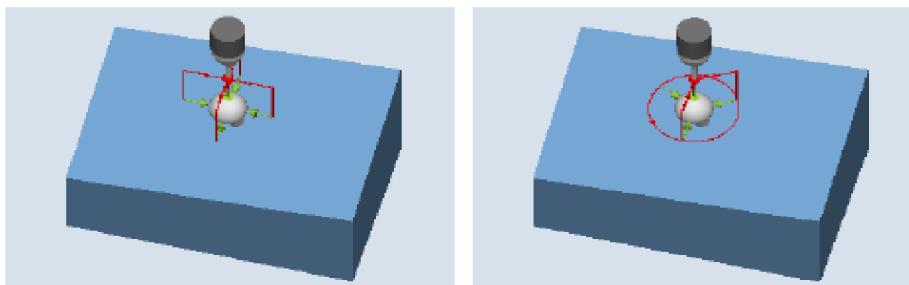
Tímto způsobem lze pomocí měření ve 3 bodech zjistit natočení dané roviny v prostoru a následně provést natočení souřadného systému k této rovině. (6)



Obr. 11 – Měření roviny

Měření koule

Tímto způsobem měření lze zjistit polohu středu koule (u tohoto způsobu měření dochází ke kontaktu dvou tvarových ploch a patrně i k vzájemnému skluzu. Výsledky měření je vhodné ověřit jinou metodou). (6) (1)



Obr. 12 – Měření koule

Kalibrace obrobkové měřicí sondy

Před každým novým měřením je doporučeno provést kalibraci měřicího čidla. Na toto doporučení je nutné dbát zejména u velkých a těžkých obráběcích strojů, kde díky objemu hmoty stroje dochází vlivem vnějšího prostředí k jeho nestabilitě – polohová přesnost jednotlivých os. Kalibrací se korigují spínací body.

Lze konstatovat, že s takto dodanými cykly a patřičnou volbou vstupních parametrů jednotlivých cyklů, popř. kombinací jednotlivých metod měření, se v praxi může uskutečnit cca 95 % všech požadovaných případů měření. U zbylých 5 % však existují výjimky, jako jsou např. matematicky těžko definovatelné tvary, kde tyto standardní cykly použít nelze. Pak je třeba vytvořit vlastní cykly měření.

3.3 Možnosti různých řídicích systémů

V oboru těžkých obráběcích strojů nabízí většina jejich světových výrobců především řídicí systémy od společností Siemens, Heidenhain nebo Fanuc. Vývoj i četnost použití závisí výhradně na zákaznících – koncových uživateli těchto strojů a souvisí s cílovou destinací

umístění daného stroje (Asie preferuje Fanuc/Siemens, Evropa + Rusko preferují Siemens/Heidenhain, Amerika preferuje Fanuc).

3.3.1 Siemens

Firma Siemens používá ve svých řídicích systémech Sinumerik pro měření sadu měřících cyklů, které mohou být pomocí parametrů přizpůsobeny konkrétnímu typu měření. Měřící sonda je zde označena jako měřící čidlo. Lze použít čidla od různých výrobců, u konkrétního použitého čidla je vyžadováno, že při vychýlení musí být vydáván konstantní signál (ne impuls) a měřící čidlo musí spínat téměř bez odskakování. V cyklech měření je nutno udat typ čidla prostřednictvím parametru. Dále se v cyklech pomocí parametru definuje, jakým způsobem se dané čidlo použije: (6)

- monočidlo (během měření / kalibrace dochází k otáčení vřetene)
- multičidlo (během měření / kalibrace nedochází k otáčení vřetene)

Kalibrace měřícího čidla

U frézek a obráběcích center se měřící čidlo obvykle podává ze zásobníku nástrojů do vřetena, čímž mohou při dalších měřeních vznikat chyby podmíněné tolerancemi upnutí měřícího čidla ve vřetenu. Kromě toho je nutno přesně zjistit spínací bod (tzv. trigger point) měřícího čidla ve vztahu ke středu vřetena. K tomu slouží kalibrační cyklus, který lze vyvolat jak v ručním, tak v automatickém režimu. Kalibrace se provádí buď v libovolném otvoru nebo na ploše (podle toho se rozlišuje typ kalibrace “na délku” a “na poloměr” a pomocí parametru se vybírá varianta kalibrace). (6)

Kalibrace měřícího čidla v libovolném otvoru (poloměr)

Cyklus umožňuje kalibrovat měřící čidlo v libovolném otvoru vztažného kusu, např. na obrobku nebo v nastavovacím kroužku. Zjištěné spínací body jsou automaticky uloženy do příslušné datové oblasti. Před vyvoláním cyklu musí být splněny předpoklady: (6)

- měřící čidlo se nachází ve vřetenu
- v bloku korekce nástroje musí být zapsaný přibližný poloměr kuličky měřícího čidla
- musí být znám přesný průměr vztažného kusu (na nastavovacím kroužku, případně na obrobeném kusu)

Měřící čidlo před spuštěním cyklu je umístěné přibližně ve středu otvoru a na hloubce kalibrace uvnitř otvoru. Při vlastní kalibraci se nejprve zjišťuje exaktní poloha středu vztažného kusu, následně se po sobě změří 4 spínací body uvnitř otvoru.

Kalibrace měřícího čidla na libovolné ploše

Cyklus měření umožňuje kalibrovat měřící čidlo na libovolné ploše, např. na obrobku, a tím zjišťovat délku. Před vyvoláním cyklu musí být splněny předpoklady:

- měřicí čidlo se nachází ve vřetenu
- v bloku korekce nástroje musí být zapsaný přesný poloměr kuličky měřicího čidla
- v aktivním posunutí nulového bodu musí být zadána poloha vztažného bodu

Měřicí čidlo se před spuštěním cyklu umístí naproti kalibrační ploše obrobku. Vypočtená délka měřicího čidla se ukládá do bloku dat nástrojových korekcí. (6)

3.3.2 Heidenhain

V řídicích systémech Heidenhain se využívá systém předdefinovaných měřících cyklů, které mohou být dále upraveny pro specifické potřeby měření. Pro tento systém je možné využít mimo jiné měřicí sondy od stejného výrobce, tedy Heidenhain. Dále je možné využít různých upínacích kuželů a různých délek nebo průměrů měřících hrotů. Z hlediska kalibrace a životnosti je zajímavé použití optického nebo tlakového snímače. Tlakové snímače jsou schopny přesnějších výsledků, ovšem za cenu kratší životnosti. Oproti tomu optický snímač pracuje bez opotřebení a je schopen projít mnoha cykly, tedy zejména opakovanými měřeními během procesu obrábění. (3) (7)

Cyklus měření

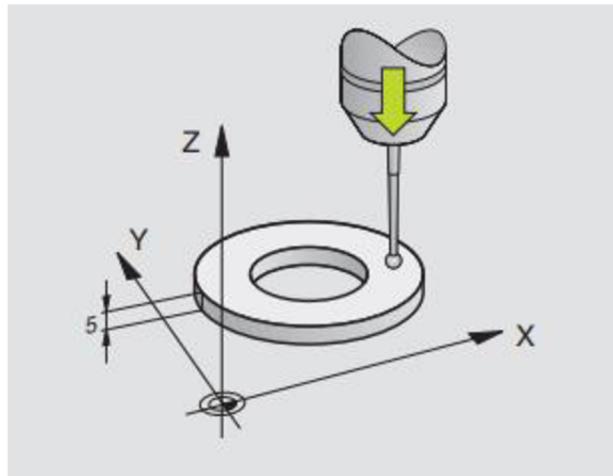
Sonda vždy najíždí paralelně s potřebnou osou, a to i v případě natočení pracoviště, nebo naklopené rovině obrábění. Když se hrot sondy dotkne obrobku, sonda vyšle signál a stroj si uloží souřadnice. Sonda okamžitě zastaví pohyb a odjíždí rychloposuvem na startovní pozici. (3)

Kalibrace měřicího čidla

Je zapotřebí upnout na pracovní plochu známý kalibrační prstenec, pak je možné provést kalibraci efektivní délky, efektivního poloměru hrotu a vyrovnání přesazení středu hrotu (v tomto pořadí). Kalibrace je možná jak v automatickém režimu, tak i režimu ručního kolečka. Nutno provádět kalibraci v těchto případech: (7)

- Uvedení do provozu
- Zlomení dotekového hrotu
- Výměna dotekového hrotu
- Změna posuvu při snímání
- Nepravidelnosti způsobené např. zahříváním stroje

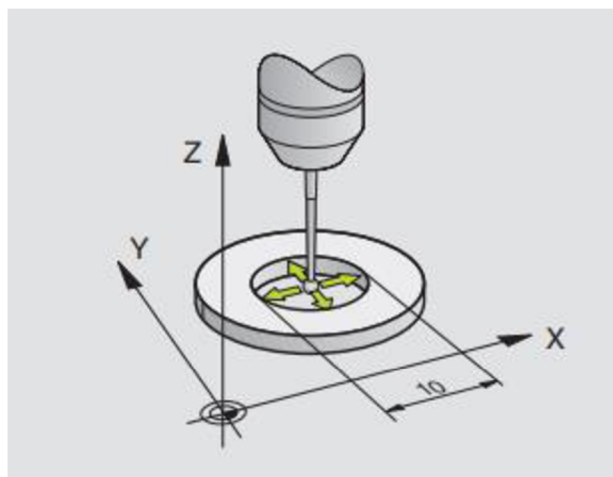
Kalibrace efektivní délky



Obr. 13 – Kalibrace efektivní délky

- Nastaví se vztažný bod
- Zadá se osa nástroje a výška prstence
- Není zapotřebí zadávat efektivní poloměr hrotu ani efektivní délku
- Ve zvolené ose se stroj dotkne prstence

Kalibrace efektivního poloměru



Obr. 14 – Kalibrace efektivního poloměru

- Ručním najetím se nastaví hrot do otvoru kalibračního prstence
- Zvolí se osa nástroje a zadá se rádius prstence
- Ve zvolených osách se stroj dotkne prstence a vypočítá rádius snímací kuličky

Určení přesazení středu snímací kuličky

Používá se pouze u strojů, které jsou k tomuto připravené výrobcem. Čidlo se otočí o 180° a znovu se spustí cyklus kalibrace efektivního rádiusu. Všechny hodnoty se ukládají do tabulky nástrojů TOOL.T. Tyto hodnoty je možné uložit pro více sad kalibračních údajů. Poté je třeba při změně nástroje vyvolat potřebná data aktivováním příslušného čísla nástroje. (7)

3.3.3 Fanuc

Firma Fanuc nemá ve svých řídicích systémech žádnou podporu pro měřící cykly. Veškerá problematika měření je ponechána na uživateli stroje. V manuálu pro výrobce stroje je popsáno, jaké parametry NC systému a jaké signály NC – PLC se používají. Využívá se pouze funkce High Speed Skip, což je přenos signálů ze sondy do NC systému (celkem 8 s reakcí <2 ms). V měřících cyklech (Custom Macro v názvosloví Fanuc) se používá příkaz G31 P90, dotyk sondy zapíše souřadnici programované osy do custom macro proměnných #5061 1.osy, #5062 2.osy atd. (8)

3.3.4 Shrnutí ŘS

Siemens – Sinumerik 840D

- lze nasadit sondy různých dodavatelů, např. Renishaw, Blum..., nutno SW konfigurace od výrobce stroje
- nabízí celou řadu základních i rozšířených měřících cyklů pro použití v ručním nebo automatickém režimu stroje. Pro jejich použití nabízí placená školení. Cykly není možno upravit – přeprogramovat bez rizika ztráty záruky na stroj, lze je však na vlastní riziko zdvojit a v použité kopii snadněji dosáhnout požadovaných funkcí. K tomu je však zapotřebí vysoká znalost programovacího jazyka i ŘS, neboť zde může být vyvoláváno velké množství podprogramů a docházet k zápisům dat do různých pamětí nebo souborů.

Heidenhain – 530 i, 640

- používá sondy vlastní konstrukce, ale lze použít i sondy různých dodavatelů
- nabízí celou řadu základních i rozšířených měřících cyklů pro použití v ručním nebo automatickém režimu stroje. Pro jejich použití nabízí placená školení. Cykly není možno upravit – přeprogramovat bez rizika ztráty záruky na stroj, lze je však na vlastní riziko zdvojit a v použité kopii snadněji dosáhnout požadovaných funkcí. K tomu je však zapotřebí vysoká znalost programovacího jazyka i ŘS.

Fanuc Series 30i, 31i, 32i

- záleží na uživateli stroje, jaký si vybere přístup k dané problematice – zda si vytvoří své vlastní měřící a kalibrační cykly nebo je zakoupí od dodavatele sondy či obráběcího stroje, popřípadě od třetí strany.

3.4 Výrobci obrobkových sond

Na trhu existuje větší počet výrobců obrobkových sond. Pro potřeby této disertační práce byli vybráni čtyři výrobci (Renishaw, Heidenhain, Blum-Novotest a Hexagon) s různým druhem měřicího mechanismu a s různým druhem přenosu signálu. Ve veřejně dostupných zdrojích byly do následující tabulky, viz Tabulka 1 – Přehled parametrů sond, zaneseny dohledané parametry: (3) (5) (9) (10)

Sonda	Blum-novotest TC52	Heidenhain TS460	Renishaw RMP60	Hexagon IRP 25.50
Směr snímání	$\pm X, \pm Y, -Z$	$\pm X, \pm Y, -Z$	$\pm X, \pm Y, -Z$	$\pm X, \pm Y, -Z$
Měřicí síla XY	2,3 N	1 N	1,4 N	1,4 N
Měřicí síla Z	5,7 N	8 N	5,3 N	13 N
opakovatelná přesnost snímání	0,3 $\mu\text{m } 2\sigma$	1 $\mu\text{m } 2\sigma$	1 $\mu\text{m } 2\sigma$	1 $\mu\text{m } 2\sigma$
Max. měřicí rychlost	2 m/min	5 m/min	N/A	2 m/min
Hmotnost	0,250 kg	0,200 kg	0,900 kg	0,920 kg
Baterie	1/2AA 3,6 V	1/2AA / LR2	2AA 3,6 V	9 V
stupeň ochrany přístroje	IP68	IP67	IPX8	IP68
přenos signálu	infračervený vysílač	Infračervený + radiový vysílač	Rádiový signál	Infračervený vysílač
Snímač	Optický	optický	Kinematický	N/A
Rozměry	$\varnothing 40 \times 62$ mm	$\varnothing 41 \times 54$ mm	$\varnothing 63 \times 76$ mm	$\varnothing 63 \times 110$ mm

Tabulka 1 – Přehled parametrů sond

Je patrné, že parametry vybraných typů obrobkových sond jsou podobné. Výjimku v tomto výběru tvoří sonda Hexagon 25.50, kde výrobce na rozdíl od konkurence řeší i zjišťování teploty obrobku během měření. Tato technologie je patentována a není možné k tomuto dohledat podrobnější informace. (10)

3.4.1 Shrnutí výrobců sond

Bližším zkoumáním obchodních případů ve firmě ŠMT, jakožto i nabytých zkušeností z realizovaných projektů po dobu posledních dvou dekad, se lze jednoznačně přiklonit k tomu, že zde nejžádanějším zástupcem ve skupině výrobců sond je firma Renishaw se svým produktem RMP60. Nadále se v této práci bude uvažovat právě tato sonda.

3.5 Současný stav problematiky kalibrace sond a měření v obecných rovinách

Ve veřejně dostupných zdrojích lze najít kusé informace o problematice kalibrace sond a měření v obecných rovinách. V těchto zdrojích se však nikde nepojednává o konkrétních řešeních, která jsou zde uvedena v kapitole 2. Cíle disertační práce. To je dáno pravděpodobně požadavkem na univerzálnost cyklu v prostředí kusové výroby a narušováním dostupnosti různých strojů s upnutými obrobky (časová náročnost odladění cyklu vs. plnění nasmlouvaných kontraktů zákazníků), dochází k přehodnocování priorit.

V následujícím textu budou uvažovány povětšinou postupy standardních měřících cyklů dodávaných spolu s ŘS. Ty mohou být užity v mnohých případech, ale nelze je brát za univerzální i pro úzce specifické aplikace vyžadující maximální eliminaci různých odchylek. K nabytí know-how potřebného pro pochopení a řešení je žádoucí participace mezi objednavatelem – zákazníkem, dodavatelem – výrobcem a třetími stranami – subdodavateli. Tomu dnes zpravidla brání tzv. konkurenční doložky, které jsou s kvalifikovanými a vedoucími zaměstnanci běžně uzavírány, a dále pak i ochrana autorských práv.

V každém případě je základní podmínkou, aby se obrobkové sondy na jakémkoliv obráběcím stroji pravidelně a řádně kalibrovaly. V odborné literatuře nebo dokumentaci výrobce stroje či ŘS lze dohledat informace o nutnosti kalibrace, o typech sond a různé postupy, jak ji provést. Nikde však neexistuje ucelený návod a přehled informací o sondách, problémech a úskalích při jejich používání. Je však jisté, že teprve každá nová aplikace měření, resp. první nasazení v praktickém provozu ukáže, zdali je možno využít standardních cyklů, nebo zdali je nutnost vytvořit / přizpůsobit nové.

S nově expedovanými speciálními stroji s daným ŘS bývají sondy expedovány jako jejich nedílná součást. Z důvodu ochrany před poškozením jsou tyto v rozloženém stavu a jejich uvádění do provozu probíhá v cílových destinacích. Zde způsobí pracovníci sondy zkompletují a zkouší přenosy signálů. Nezřídka se lze setkat s rušením signálů, zejména ve výrobních provozech, kde je investováno do většího množství bezdrátových technologií. Posléze jsou prováděny první kalibrace, čímž se zpravidla přejímky sond považují za uzavřené. Měření pak bývá v režii zákazníka (operátora / programátora), který si může vystačit se standardními nastaveními a možnostmi měřících cyklů. V ojedinělých případech nejsou sondy dokonce vůbec používány. To bývá např. z důvodu obav před falešnými výsledky způsobenými nedostatečnou kvalifikací obsluhujícího personálu, což je aktuálně celosvětový jev, který se týká jak trhů v rozvojových zemích, tak i v zemích zvyklých na high-tech technologie. Příčina je zpravidla přímo úměrná nedostatku fundovaného personálu, dříve běžně generovaného z tradičních učňovských oborů. Dále panují obavy z výsledků ovlivněných případným defektem zařízení, který nemusí být ihned patrný.

Naštěstí je však i mnoho zákazníků, kteří od svých dodavatelů požadují maximální výkon za těžce proinvestované finance. To někdy způsobuje, že jsou výrobci strojů povinni dostát svým smluvním i dodatečným závazkům, jakožto i zachování dobrého jména na obchodním trhu. Právě tyto situace mobilizují zvýšené úsilí ke splnění cílů a očekávání.

Zejména v průběhu technologických zkoušek může docházet k situacím, kdy nastává reálné používání měřící sondy. Zde se logicky uživatelé strojů – zákazníci, obrazejí na hlavního dodavatele. Případné problémy technického i obchodního charakteru se pohybují mezi čtyřmi stranami: dodavatel ŘS – dodavatel stroje – dodavatel sondy – zákazník. Dnes je již běžnou

praxí zákazníků, že specifické měřicí cykly jsou součástí technických zadání či technologických studií předkládaných v rámci výběrových řízení na nová, případně i generálovaná pracoviště. Při realizaci některých složitějších projektů se však ukazuje, že pro vlastní měření obrobkovou sondou je nezbytně nutné provést prvotně opravdu její kalibraci. Pro tu existuje v ŘS zpravidla standardní kalibrační cyklus, který je možné vyvolat v ručním nebo automatickém režimu. Ten předpokládá poloměrovou kalibraci pouze na známém průměru, obvykle pomocí nastavovacího kroužku, ale v dílenské praxi postačí ložisko, které má výrobně zaručenou kruhovitost a průměr v toleranci o řád vyšší, nežli má být požadované měření. Předpokladem takového cyklu je, že sonda napolohuje přibližně na střed kroužku / ložiska a do parametrů cyklu je zadán správný průměr. Tímto cyklem lze ověřit, zda se při měření se sondou a pro různá natočení souřadného systému kolem geometrické osy Z, vyhodnotí stejná poloha středu ložiska a stejný průměr. Pokud ano, tak se měření prohlašuje za správné a následně se provádí kalibrace obrobkové sondy na průměr. Délková kalibrace se provádí ideálně v ručním režimu (JOG) v bodě na předem obrobené ploše kolmé na osu sondy, a to s upnutým nástrojem o známé délce.

K problematice měření v obecných rovinách toho lze dohledat mnohem méně než k problematice kalibrace sond. Hledáním a rešerší vědeckých článků bylo nalezeno několik zdrojů, které se okrajově o této problematice zmiňují. Pravděpodobně doposud nejvíce informací obsahuje článek Polynomial Interpolation in 5-Axis Milling (11), zde se však píše o polynomiálních transformacích při pěti-osém obrábění a využití spline interpolací (jedná se o kubickou interpolaci obloukových křivek) na obráběných plochách, což však s tématem měření obecných prostorových ploch přímo nekoresponduje. Dalším zdrojem, který se této problematice přibližuje, je Measurement of Machine Tool Geometric Errors (12), zde ale autoři popisují nové zařízení, kterým lze pomocí laseru provést měření geometrických chyb vlastního obráběcího stroje. Posledním nalezeným zdrojem je článek Volumetric Compensation of Three-Axis Vertical Machining Centre (13), který však poukazuje na použití volumetrických (objemových) kompenzací obráběcího stroje. Jedná se o měření geometrických chyb a jejich kompenzací v celém objemu pracovního prostoru stroje, které lze obsáhnout pomocí interpolace jednotlivých strojních os. Nebyl nalezen žádný zdroj popisující transformace (posun a rotace) na obráběcích strojích pomocí frézovacích hlav, otočných stolů, polohovacích zařízení a jejich kombinací. Prakticky se tyto transformace používají v cyklech dodavatele operačního systému, např. u SINUMERIC se jedná o cykly TRAORI nebo CYCLE800, ale bez podrobnějších informací o použití matematických vztahů a různých kombinací natočení v prostoru. V této práci bude kladeno za cíl popsat výše uvedené transformace a rozšíření jejich použitelnosti.

4. POUŽITÍ OBROBKOVÝCH SOND

Každý výrobce obráběcích strojů řeší problematiku měření obrobků a kalibrování sond po svém, a to s přihlédnutím ke střednědobým požadavkům na obchodním trhu. Zejména s ohledem na počty vyrobených, resp. dodaných kusů strojů v totožných, případně velmi podobných konfiguracích se jedná o velmi individuální politiku konkrétního výrobce. Obecně lze říci, že vzhledem k neklesajícím tlakům na prodejní ceny se jakékoliv hlubší nároky v této oblasti měření řeší jako SW nebo technologické opce za příplatky.

Výrobci strojů zde chrání svá autorská práva, speciálně vyvinuté cykly či programy rádi prodávají opakovaně, a proto nejsou tyto volně dostupné ani konkrétně zmiňované na jejich webových stránkách zabývajících se prodejními a servisními službami. V další části této práce proto bude uvažováno o sondě RMP 60 od výrobce Renishaw a jejím použití na horizontálních frézovacích strojích ŠKODA, typ HCW nebo FCW, případně na portálovém frézovacím stroji ZIMMERMANN, typ FZ42, vybavených ŘS SINUMERIK 840 D, verze Solution Line. Pro vyšší verze řídicího systému SIN 840 D, nebo pro řídicí systémy jiných výrobců (např. Heidenhain, Fanuc apod.), nemusí použití sond, případně cyklů řešených v této disertační práci přesně odpovídat textu.

U zákazníka v USA byl řešen problém obrábění turbínových a generátorových rotorů, a to až do hmotnosti 350 tun. Jednalo se zejména o zaměření těchto rotorů v automatickém režimu (dále jen AUT), pomocí sondy Renishaw RMP60.

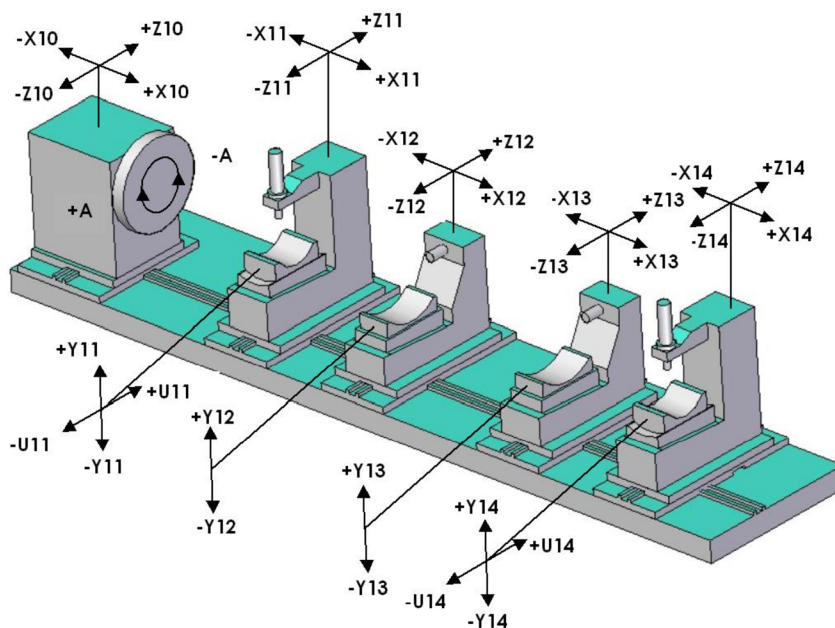


Obr. 15 – Stroj HCW3 – 250 Nc s polohovadlem IOV 350

K danému způsobu obrábění byl dodán stroj Škoda HCW 3-250 Nc s polohovadlem IOV 350, viz Obr. 15 – Stroj HCW3 – 250 Nc s polohovadlem IOV 350.

4.1. Popis praktické aplikace – očekávání

Před vlastním založením prvního obrobku / rotoru se nabízí prostor k otestování všech 32 automaticky řízených os, z nichž jedna polovina slouží výhradně k natáčení a vlastnímu rovnání rotoru vůči souřadnému systému stroje, a to i se zohledněním průhybu obrobku vlivem vlastní hmotnosti, viz Obr. 16 – Rozložení a směr os IOV. Pro rovnací cyklus, který zajišťuje výpočet potřebných délek drah jednotlivých os a všechny spojené funkce jako jsou uvolňování, interpolování, naklápění a upínání je nutno zaměřit aktuální reálnou polohu rotoru. Zde přichází na řadu obrobková sonda a přesnost i opakovatelnost měření. Předpřipravený cyklus se testoval přímo na rotoru s ideou, že lze ověřit výsledky pomocí paralelně prováděných konvenčních měření (pomocí indikátorů apod.). Zprvu zaměřené polohy vykazovaly předpokládané odchylky, které se postupně opakovaným měřením a následným vyrovnáváním rotoru dostaly až do požadovaných tolerančních mezí – max. dovolená odchylka byla 0,02/4000 mm. Jak se později ukázalo, vlastní vyrovnání rotoru nemělo zásadní dopad při použití nepřesných výsledků měření, a to právě se skutečností, kdy byly všechny body naměřeny s přibližně stejnými odchylkami. Při vlastním porovnání jednotlivých naměřených hodnot se veškeré chyby vyrušily a výsledné rozdíly pak odpovídaly skutečnosti, a postupně se zmenšovaly, až další měření nebylo potřeba. Při následném zaměření osy rotoru, či jeho jednotlivých segmentů, které by měly tvořit nulové body obrobku pro použití v následných NC programech, však oproti konvenčním metodám měření vycházely odchylky v rádech desetin, až jednotek milimetrů. To jednoznačně ukazovalo na špatně zaměřenou polohu nulového bodu pomocí obrobkové sondy.



Obr. 16 – Rozložení a směr os IOV

Bylo tedy třeba provést novou standardní kalibraci sondy a měření opakovat. To však žádné zlepšení nepřineslo. Zde nastala potřeba vyzkoušení jednotlivých měřících cyklů, a to nejprve bez technologických příslušenství – vřetenem stroje na nastavovacím kroužku určeném ke kalibraci. V průběhu jeho instalace na provizorně vytvořené stanoviště neustále docházelo k situacím, kdy někteří interní i externí zaměstnanci pohybující se na stanovišti měli tu potřebu se opakovaně o kalibrační místo opírat, čímž došlo k jeho poškození. V daných podmínkách bylo alternativně demontováno nové kuličkové ložisko a použit jeho vnitřní kroužek o jmenovitém vnitřním průměru 60 mm. Kroužek byl odnesen do seřizovny nástrojů, kde došlo k jeho proměření na 3D měřícím souřadnicovém přístroji. Výsledky měření potvrdily výrobcem uváděnou přesnost. Kroužek byl ustaven a upevněn na obrobenou plochu obrobku a prohlášen za nové kalibrační místo a mohla být započata kontrolní měření.

Sondou upnutou ve vřetenu stroje byl v ručním režimu zaměřen střed vnitřního průměru kroužku. Byla provedena kalibrace obrobkové sondy metodou Multi (metoda, kdy nedochází k natáčení sondy a měří se na víc spínacích bodů). Následovalo měření středu a průměru kroužku na čtyři body po 90° v nenatočeném souřadném systému. Následovala totožná měření s postupným natáčením prostoru kolem osy Z v kroku po 10°, a to až do konečné hodnoty 180°. Naměřené hodnoty jsou uvedeny viz Tabulka 2 – Ověření přesnosti měření, kalibrace. Z důvodu opakovatelnosti výsledků byla provedena dvě kontrolní měření za totožných podmínek. Odchylky však byly v řádech do 0,005 mm, tedy pro tyto účely zcela zanedbatelné. Jak je patrné z tabulky, střed kroužku vycházel pro všechna měření ve vyhovujících odchylkách, avšak měřený průměr kroužku byl proměnný, resp. v nevyhovujících odchylkách přesahujících 0,1 mm. To samo o sobě značí, že takové měření nelze použít dále.

Ověřování přesnosti měření se sondou na nastavovacím kroužku			
Stav kalibrace: Multi, na střed nastavovacího kroužku			
Referenční hodnota – vnitřní průměr nastavovacího kroužku 60,001			
Stroj: ŠKODA HCW 2–200, v.č.: Ob 21317			
Obrobková měřicí sonda: RENISHAW RMP 60, v.č.: 58W011			
Nastavovací kroužek 60/90			
Číselníkový úchylkoměr: Somet Číselníkový indikátor, v.č.: 52010420			
Zjištěné souřadnice středu dle měřicí sondy: X: 1805.323, Y: 805.983, Z: -145.655			
Zjištěné souřadnice středu nezávisle: X: 1805.352, Y: 805.954, Z: -145.651			
Natočení souř. systému	Zjištěný průměr	Souřadnice středu	
		X ₀	Y ₀
0°	60,061	0,004	0,003
10°	60,069	0,003	0,004
20°	60,102	0,003	0,002
30°	60,115	0,004	0,003
40°	60,121	0,006	-0,002
50°	60,123	0,005	-0,003
60°	60,134	0,007	-0,002
70°	60,128	0,006	-0,004

80°	60,125	0,004	0,003
90°	60,131	0,005	-0,004
100°	60,124	0,003	0,006
110°	60,064	0,002	-0,003
120°	60,113	0,006	-0,005
130°	60,098	0,005	-0,014
140°	60,087	-0,002	-0,003
150°	60,073	0,001	-0,004
160°	60,065	0,003	-0,002
170°	60,067	0,002	0,002
180°	60,064	0,003	0,004

Tabulka 2 – Ověření přesnosti měření, kalibrace MULTI

4.2. Hledání vhodné aplikace – proč nefungují zařité metody

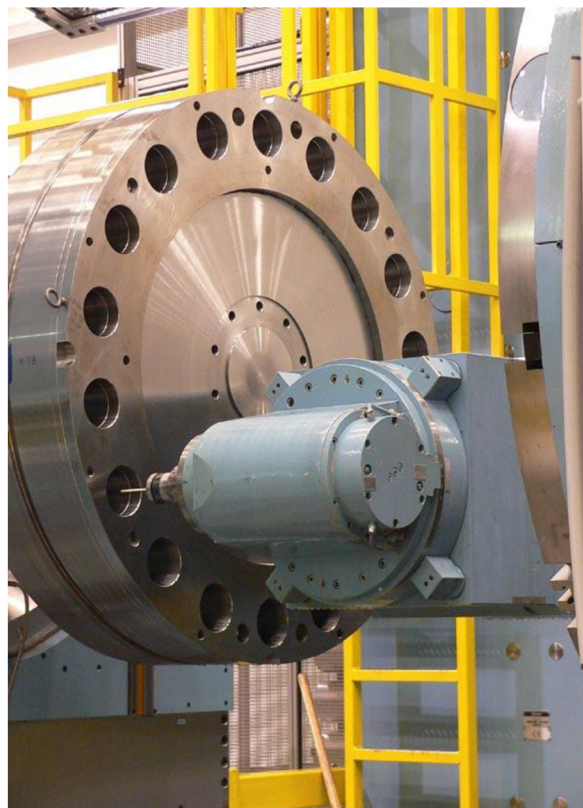
Sondou upnutou ve vřetenu stroje byl v ručním režimu zaměřen střed vnitřního průměru kroužku. Z daného středového bodu byla spuštěna kalibrace obrobkové sondy metodou MULTI v nenatočeném souřadném systému. Následovalo měření středu a průměru kroužku na čtyři body po 90°, tedy stejná příprava jako v podkapitole 4.1. Popis praktické aplikace – očekávání. Po každém natočení prostoru kolem osy Z v kroku po 10° byla provedena nejprve nová kalibrace, a pak až samotné měření. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 3 – Ověření přesnosti měření, kalibrace MULTI s krokem 10°. Z důvodu opakovatelnosti výsledků byla provedena opět dvě kontrolní měření za totožných podmínek. Odchytky byly zanedbatelné, tentokrát i v měřených průměrech kroužku.

Ověřování přesnosti měření se sondou na nastavovacím kroužku			
Stav kalibrace: Multi, krok 10°			
Referenční hodnota – vnitřní průměr nastavovacího kroužku 60,001			
Stroj: ŠKODA HCW 2–200, v.č.: Ob 21317			
Obrobková měřicí sonda: RENISHAW RMP 60, v.č.: 58W011			
Nastavovací kroužek 60/90			
Číselníkový úchylkoměr: Somet Číselníkový indikátor, v.č.: 52010420			
Zjištěné souřadnice středu dle měřicí sondy: X: 1805.339, Y: 805.971, Z: -145.649			
Zjištěné souřadnice středu nezávisle: X: 1805.348, Y: 805.951, Z: -145.656			
Natočení souř. systému	Zjištěný průměr	Souřadnice středu	
		X ₀	Y ₀
0°	59,999	0,002	-0,002
10°	60,007	0,002	-0,001
20°	60,017	0,001	-0,001
30°	60,034	0,001	-0,001
40°	60,052	0,003	-0,004
50°	60,049	0,001	-0,005

60°	60,068	0,003	-0,005
70°	60,055	0,002	-0,003
80°	60,048	0,004	-0,002
90°	60,017	0,004	-0,002
100°	60,049	0,003	0,004
110°	60,033	0,002	-0,002
120°	60,021	0,001	-0,001
130°	60,016	0,002	-0,004
140°	60,014	0,000	-0,004
150°	60,008	0,001	-0,002
160°	60,005	0,002	-0,003
170°	60,002	0,003	-0,002
180°	60,000	0,003	-0,003

Tabulka 3 – Ověření přesnosti měření, kalibrace MULTI s krokem 10°

Z výše popsaného případu měření lze předpokládat, že problém s odchylkami způsobenými kalibrací by měl být vyřešen. Na pinolu stroje byl tedy nabrán prodlužovací nástavek s úhlovou frézovací hlavou, v jejímž vřetenu je upnutá měřicí sonda. Pomocí soustavy stroje a tohoto příslušenství lze změřit hodnoty pro automatické vyrovnání příruby rotoru a nalezení jejího středu, viz Obr. 17 – Měření příruby rotoru pomocí obrobkové sondy v hlavě IFVW103.



Obr. 17 – Měření příruby rotoru pomocí obrobkové sondy v hlavě IFVW103

Následnou kontrolou pomocí číselníkového úchylkoměru upnutého na frézovací hlavě bylo potvrzeno správné vyrovnaní celé příruby ve všech třech osách, avšak zároveň byl zjištěn chybně vyhodnocený střed – nulový bod s odchylkou až 0,3 mm. To by znamenalo při spuštění NC programu s návaznými obráběcími operacemi bezpochyby zmetkový celý rotor. To logicky vedlo k myšlence špatně nastavených či vlivem teploty rozhozených rozměrových vektorů (offsetů) nastavku a hlavy, které se zadávají jako tzv. statické a dynamické hodnoty do dat stroje. Bylo tedy provedeno ověření těchto hodnot, jejich korekce (v řádu 0,01 mm) a následné opakování zaměření středu příruby rotoru. Výsledky měření byly opět vyhodnoceny s odchylkou až 0,3 mm oproti kontrole analogickou metodou pomocí přípravku s číselníkovým úchylkoměrem (tzv. “svěšování” ukazatele číselníkového indikátoru bylo potvrzeno o jeden řád nižší než celková odchylka). Nezbyvalo nežli se opět vrátit ke způsobu kalibrace sondy a způsobu jejího následného použití.

Sondou upnutou ve vřetenu hlavy byl v ručním režimu zaměřen střed vnitřního průměru kroužku. Z daného středového bodu byla spuštěna kalibrace obrobkové sondy metodou multi v natočeném souřadném systému. Následovalo měření středu a průměru kroužku na čtyři body po 90°, tedy stejná příprava jako v podkapitole 4.1. Popis praktické aplikace – očekávání. Po každém natočení prostoru kolem osy Z v kroku po 10° byla provedena nejprve nová kalibrace, a pak až samotné měření. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 4 – Ověření přesnosti měření s krokem 10° a hlavou IFVW103, metoda MULTI. Z důvodu opakovatelnosti výsledků byla provedena opět dvě kontrolní měření za totožných podmínek. Jak je patrné, střed kroužku vycházel v nevyhovujících odchylkách přesahujících 0,3 mm. Takové měření nelze použít dále.

Ověřování přesnosti měření se sondou na nastavovacím kroužku			
Stav kalibrace: s krokem 10°			
Referenční hodnota – vnitřní průměr nastavovacího kroužku 60,001			
Stroj: ŠKODA HCW 2–200, v.č.: Ob 21317, Hlava: IFVW103, v.č.: Obp 22857			
Obrobková měřicí sonda: RENISHAW RMP 60, v.č.: 58W011			
Nastavovací kroužek 60/90			
Číselníkový úchylkoměr: Somet Číselníkový indikátor, v.č.: 52010420			
Zjištěné souřadnice středu dle měřicí sondy: X: -2504.971, Y: 1475.305, Z: -1185.053			
Zjištěné souřadnice středu nezávisle: X: -2505.110, Y: 1475.630, Z: -1158.320			
Natočení souř. systému	Zjištěný průměr	Souřadnice středu	
		X ₀	Y ₀
0°	60,001	-0,001	0,001
10°	60,003	-0,002	0,000
20°	60,000	0,001	0,001
30°	60,002	0,000	0,002
40°	60,001	0,002	-0,002
50°	59,999	-0,002	-0,001
60°	60,001	0,001	0,000
70°	60,002	0,002	0,000

80°	60,001	0,000	0,002
90°	59,998	0,002	-0,002
100°	60,001	0,001	0,001
110°	60,003	-0,002	-0,002
120°	60,000	0,001	-0,002
130°	59,999	0,000	0,001
140°	60,001	0,002	0,001
150°	60,002	0,000	-0,002
160°	60,000	-0,001	0,001
170°	60,002	-0,002	0,001
180°	60,001	0,000	-0,002

Tabulka 4 – Ověření přesnosti měření s krokem 10° a hlavou IFVW103, metoda MULTI

Sondou upnutou ve vřetenu hlavy byl v ručním režimu zaměřen střed vnitřního průměru kroužku. Z daného středového bodu byla spuštěna kalibrace obrobkové sondy metodou mono (měřící metoda, při které dochází k natáčení vřetene a měří se na jeden bod na měřícím doteku) v natočeném souřadném systému. Následovalo měření středu a průměru kroužku na čtyři body po 90°, tedy stejná příprava jako v podkapitole 4.1. Popis praktické aplikace – očekávání. Po každém natočení prostoru kolem osy Z v kroku po 10° byla provedena nejprve nová kalibrace, a pak až samotné měření. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 5 – Ověření přesnosti měření s krokem 10° a hlavou IFVW103, metoda MONO. Z důvodu opakovatelnosti výsledků byla provedena opět dvě kontrolní měření za totožných podmínek. Odchytky byly zanedbatelné jak v měřených průměrech kroužku, tak i polohou středu – kontrolováno analogickou metodou pomocí přípravku s číselníkovým úchylkoměrem.

Ověřování přesnosti měření se sondou na nastavovacím kroužku			
Stav kalibrace: MONO, s krokem 10°			
Referenční hodnota – vnitřní průměr nastavovacího kroužku 60,001			
Stroj: ŠKODA HCW 2–200, v.č.: Ob 21317, Hlava: IFVW103, v.č.: Obp 22857			
Obrobková měřící sonda: RENISHAW RMP 60, v.č.: 58W011			
Nastavovací kroužek 60/90			
Číselníkový úchylkoměr: Somet Číselníkový indikátor, v.č.: 52010420			
Zjištěné souřadnice středu dle měřící sondy: X: -2505.121, Y: 1475.615, Z: -1185.341			
Zjištěné souřadnice středu nezávisle: X: -2505.116, Y: 1475.624, Z: -1158.317			
Natočení souř. systému	Zjištěný průměr	Souřadnice středu	
		X ₀	Y ₀
0°	60,009	-0,007	0,001
10°	60,007	-0,005	0,004
20°	60,006	-0,009	0,011
30°	60,004	0,003	0,008
40°	60,005	0,005	-0,00
50°	59,994	0,009	-0,001
60°	60,008	0,006	0,006
70°	60,004	0,007	0,010

80°	60,006	0,002	0,012
90°	59,993	0,007	0,008
100°	60,011	0,004	0,011
110°	60,003	-0,003	0,005
120°	60,007	0,004	0,009
130°	59,995	0,005	0,010
140°	60,003	0,002	0,008
150°	60,005	-0,003	0,012
160°	60,004	-0,005	0,011
170°	60,005	-0,007	0,009
180°	60,003	-0,003	-0,004

Tabulka 5 – Ověření přesnosti měření s krokem 10° a hlavou IFVW103, metoda MONO

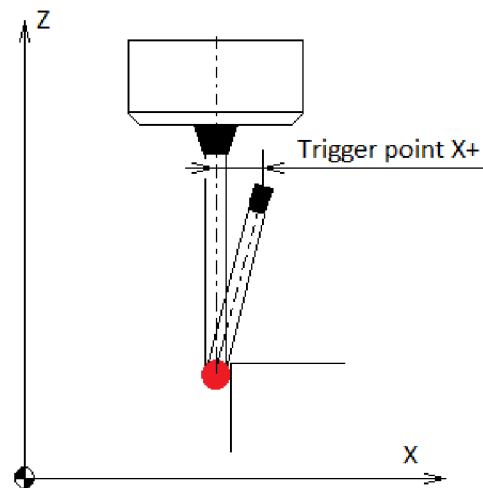
4.3. Nalezení vhodné kalibrační metody

Před započítím jakéhokoliv měření by měl být brán ohled na tato obecně platná doporučení:

- pravidelně kalibrovat sondu – na délku i na průměr. Kalibrace sondy není přenositelná mezi jednotlivými technologickými zařízeními, případně mezi vřetenem stroje a technologickým zařízením
- je nutné kalibrovat sondu pro každé nové natočení souřadného systému (CYCLE800, TRAORI)
- kalibrovat po každé výměně měřicího doteku – např. pokud dojde ke kolizi a zničení měřicího doteku nebo např. při výměně za jiný typ měřicího doteku. Toto nelze plně implementovat do cyklu, záleží vždy na svědomitosti obsluhy stroje a lze to brát jako doporučení
- kalibrovat po každé výměně za jiný nástroj
- pokud bylo před vlastním měřením se strojem obráběno, je nutné provést, vzhledem k teplotním dilatacím stroje, kalibraci sondy
- při měření programovat stejný posuv jako při kalibraci – obecně je doporučen posuv 300 mm/min
- zvolit pro dané měření správný typ kalibrace měřicího čidla – multi / mono
- volba vhodné délky měřicího doteku – u příliš krátkého doteku nemusí dojít ke kontaktu s obrobkem v místě předpokládaného měření a tím pádem hrozí kolize stroje nebo sondy. Příliš dlouhý dotek, nebo dotek složený z několika kusů ovlivňuje přesnost měření
- volba vhodného průměru kuličky – příliš malý průměr může způsobit sepnutí sondy vlivem kolize dřívku doteku s měřeným obrobkem. Případně může při měření hrubších povrchů zkreslovat informace měřením v jeho nerovnostech

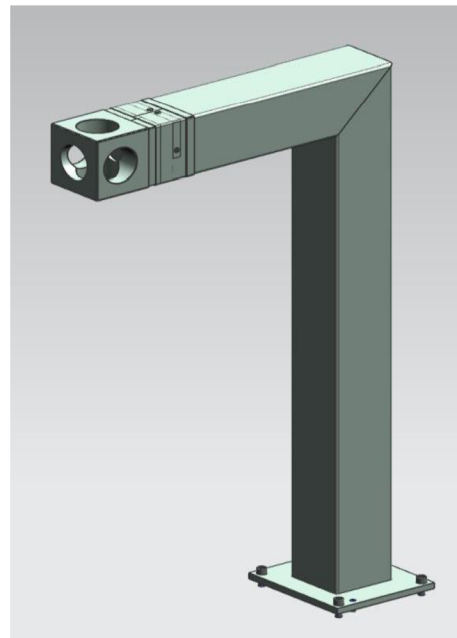
Kalibrace měřicí sondy zjednodušeně řečeno říká, o kolik mm je nutné přejet přes zamýšlenou měřenou pozici, než dojde k sepnutí sondy, přenesení a vyhodnocení signálu v NC systému – viz Obr. 18 – Spínací bod (6). Tyto přejezdy se v literatuře uvádějí jako tzv. spínací body (trigger points) a jsou uloženy v globálních uživatelských proměnných daného NC systému. Každou následnou kalibrací se tato data přepisují a používají se v měřících cyklech při výpočtech naměřených hodnot, proto při přesném měření nelze tento faktor zanedbávat. V praxi však drtivá většina uživatelů NC strojů tento jev nebere v potaz a vystačí

si s tím, že sonda je univerzálně zkalibrována již od dodavatele a další případnou kalibraci tudíž neřeší.



Obr. 18 – Spínací bod

Pro zajištění správného postupu kalibrování je třeba na pracovišti vytvořit vhodné kalibrační místo, mít kolem tohoto místa dostatek prostoru pro bezpečné použití i v kombinaci použití s hlavami. Příklad řešení kalibračního stojánek a jeho prozatím poslední verze (pouze pro základní nenaklopné roviny), viz Obr. 19 – Kalibrační stojánek.



Obr. 19 – Kalibrační stojánek

Z naměřených výsledků v předchozí kapitole jednoznačně vyplývá fakt, že po každém nabrání měřící sondy do vřetena stroje nebo technologického příslušenství (frézovací hlavy) je nutné provést novou kalibraci, stejně tak i po každém odložení a zpětném nabrání totožné či

jiné hlavy z paletového systému stroje. Obdobně je nutno znovu kalibrovat příslušnou měřicí sondu s novým a každým dalším natočením souřadného prostoru, což je logicky dáno i rozdílnými parametry strojních os se značně odlišnými hmotnostmi pohybujících se částí stroje, ze kterých je složen výsledný pohyb dané geometrické osy / geometrických os. Byť kalibrace v natočené rovině může být komplikovaná z pohledu dostupnosti, případně i upevnění kalibračního prvku (ideálně kroužku o známém průměru), její provedení lze jen doporučit.

Při měření je nutno dbát na výběr vhodné metody mono/multi. Byť by měly teoreticky oba druhy dosahovat stejných výsledků měření, tak bylo výše potvrzeno, že pro zaměření středů, roztečí apod., je vhodnější volit metodu mono měření, naopak při měření délek, průměrů apod., je vhodnější volit metodu multi měření.

Při nedodržování provádění pravidelné kalibrace měřicí sondy dochází, zejména u mechanických hlav s hirthovým ozubením, k značnému zkreslení naměřených výsledků. Toto je způsobeno tím, že žádný měřicí dotek z výroby není ideálně rovný. U každého doteku tak dochází k určitému prohnutí a při kalibraci sondy jsou tato vyosení zahrnuta ve spínacích bodech a jsou přímo závislá na natočení vřetene během provedené kalibrace. Pro každé natočení vřetene tak budou vyhodnoceny rozdílné parametry. Při používání hlav s hirthovým ozubením dochází během natáčení zařízení do nové pracovní roviny k rozpojení vazby mezi pevnou a otočnou částí a tím k zanesení rozdílu mezi polohou vřetene stroje a polohou vřetene hlavy a tedy ke ztrátě mezi polohou vřetene stroje a vřetene zařízení. U hlav s více než jedním hirthovým ozubením, případně i s jiným převodovým poměrem vůči vřetení stroje, může být vyhodnocení polohy vřeten obtížné, jelikož by musel být před každým měřením proveden přepočítání a rozklad prohnutí doteku do spínacích bodů, což je pravděpodobně matematicky možné, ale prakticky neproveditelné a proto byl vyvinut vlastní univerzální kalibrační cyklus PROBE_CALIB.

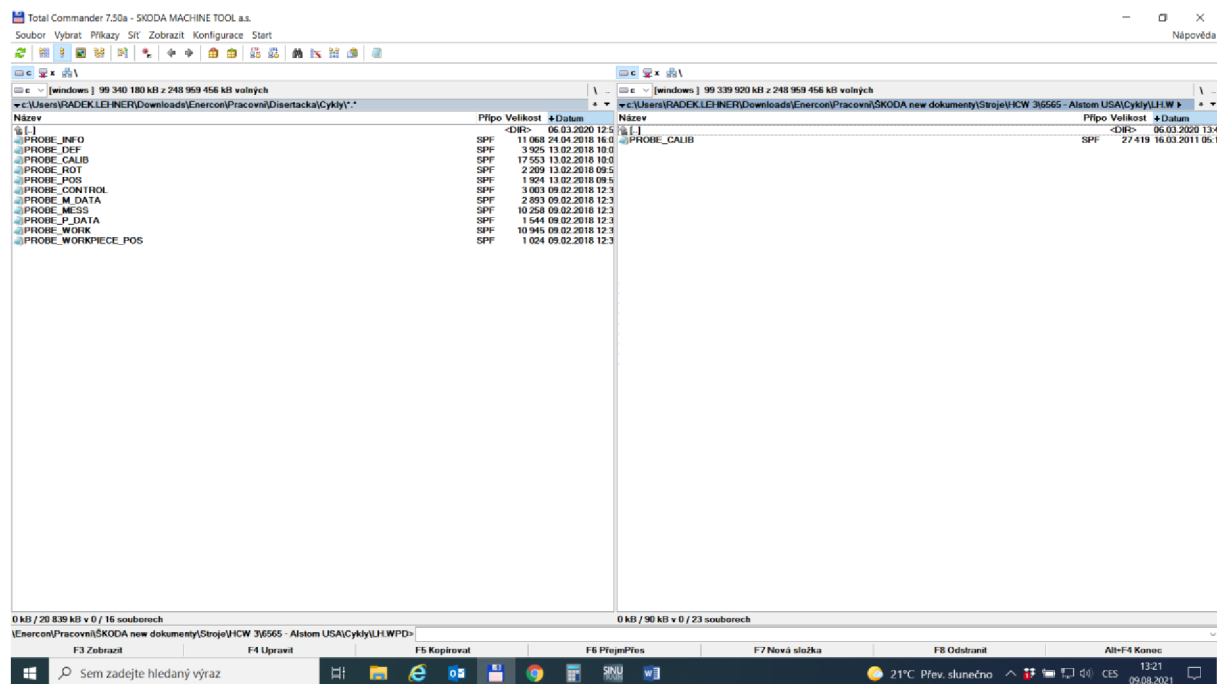
Tvorba každého cyklu je otázkou určitého vývoje skládajícího se z několika fází, u tohoto kalibračního cyklu tomu bylo také tak a vývoj procházel těmito fázemi:

- projektové předpřípravy (parametry, funkce, návrh řešení, protokolování, atd.),
- vytvoření programu na externím zařízení (PC), tzn. nultá verze celého cyklu a souvisejících podprogramů
- mechanická instalace kalibračního místa
- instalace programu na obráběcí stroj a funkční odladění
- uvádění do provozu, testování na pevných i přenosných kalibračních místech
- rozšiřování a postupný vývoj kalibračního cyklu, ošetření možných vzniků kolizí, použití měřících cyklů, ověřování správnosti naměřených hodnot

Je možno konstatovat, že poslední fáze vývoje je s ohledem na univerzálnost v podstatě nikdy nekončící proces, a to zejména v podmínkách kusové výroby. V okamžiku, kdy je dosaženo již vyšší úrovně cyklu, nelze testovat všechny funkce bez uvolnění celého výrobního zařízení (obráběcího stroje), které může trvat v řádech dnů až týdnů, zejména pak i ve spojení s následným měřením na reálných obrocích a zachováním požadavků na bezpečnost práce. Jedná se tedy o záležitost, kterou je nutno později z nákladových i termínových důvodů

(hodinová sazba stroje, plnění termínů produkce) zařadit do plánu výroby (zakázková náplň, plánované odstávky a údržba) a využít operativně neplánovaných prostojů v délce trvání ½ pracovní směny a více (zdržení polotovarů, subdodávek, manipulačních zařízení, atd.).

Od vytvoření nulté verze v.0 až po odladění současné poslední verze v.3.4 uplynuly v tomto případě přibližně tři roky hrubého času s tím, že všechny funkce byly vyzkoušeny až po konečný protokol, viz Obr. 20 – Postup vývoje cyklu PROBE_CALIB.



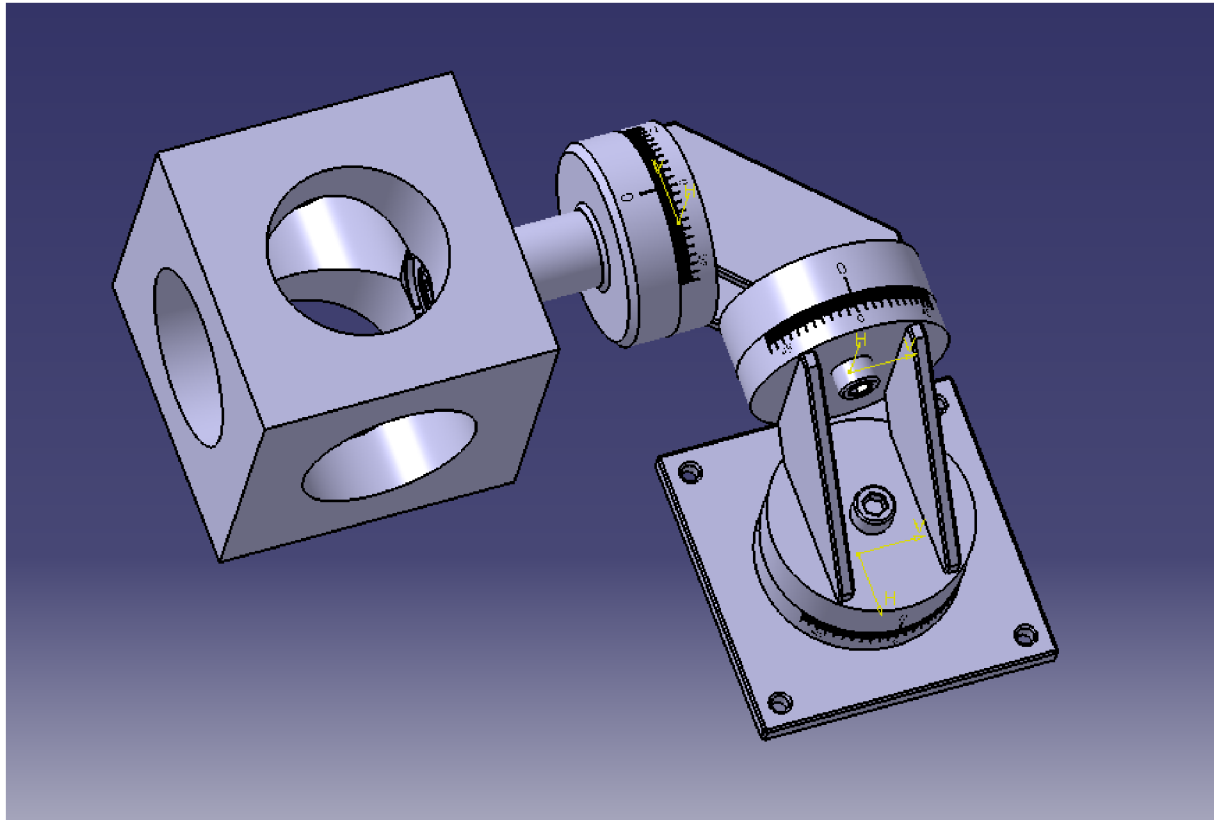
Obr. 20 – Postup vývoje cyklu PROBE_CALIB

Návazně na uvedený univerzální kalibrační cyklus je možno vytvářet měřicí programy a používat měřicí cykly pro zaměřování obrobků a jejich jednotlivých prvků.

4.3.1 Popis kalibračního cyklu PROBE_CALIB

Pomocí cyklu je možno provést kalibraci obrobkové sondy, která je upnutá ve vřetenu stroje nebo technologickém zařízení. Cyklus umožňuje bezpečné přejetí z výchozího místa až ke kalibračnímu místu. Kalibrační místo se skládá ze stojánku a kalibrační kostky, které je nutno před prvním použitím vyrovnat paralelně s pojezdem stroje a provést řádné zaměření středu jednotlivých kalibračních otvorů. Takto připravené místo lze použít pro kalibraci sondy v základních kolmých rovinách. Pro případ kalibrace v jinak natočeném souřadném systému, lze kalibrační kostku pomocí kloubového mechanismu přenastavit do vhodné pozice a provést její dorovnání pomocí stroje v nakloněném prostoru a zaměřit střed kalibračního otvoru, viz Obr. 21 – Návrh kloubového mechanismu. V případě, že z technologických důvodů není možné se strojem bezpečně dojet ke kalibračnímu místu, lze ke kalibraci použít předem zhotovený a vhodný otvor na produkčním obrobku. Na konci provedeného cyklu se do GUD parametrů stroje uloží data o právě provedené kalibraci, použitém zařízení, a čase (pokud je stroj vybaven

opcí teplotní stability, tak se uloží i aktuální teplota vřeteníku). Tato data se při dalším vyvolání cyklů porovnávají s aktuálním stavem a pokud je zjištěna odchylka, upozorní obsluhu stroje o nutnosti provedení nové kalibrace sondy. Cyklus a všechny jeho podcykly je třeba nahrát do složky uživatelských cyklů a aktivovat.



Obr. 21 – Návrh kloubového mechanismu

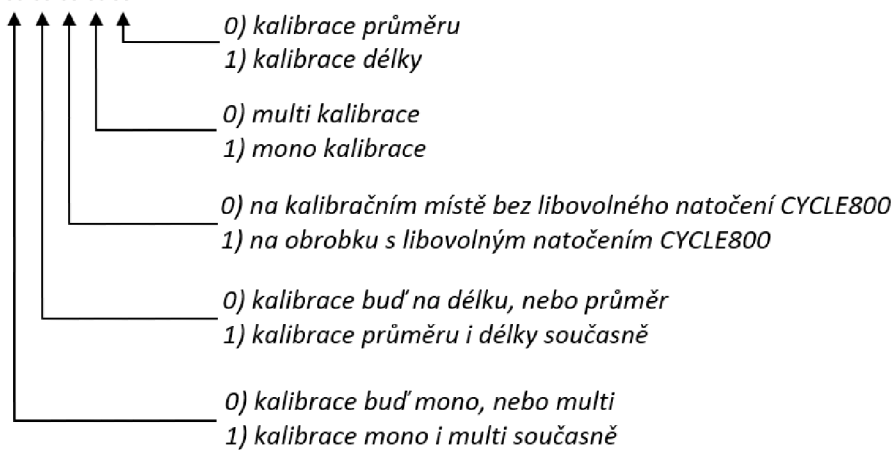
PROBE_CALIB (_Head, _No, _Ang, _Type, _Dia, _Len, _Mode)

_Head	string	Použité technologické příslušenství
_No	integer	Pozice kalibračního místa na kalibračním stojánku
_Ang	real	Úhel natočení
_Type	integer	Typ zvolené kalibrace
_Dia	real	Průměr kalibračního otvoru (pouze v případě kalibrace tzv. "na kusu")
_Len	real	Poloha kalibračního otvoru v ose Z (pouze v případě kalibrace tzv. "na kusu")
_Mode	integer	Binární kombinace natočení souřadného systému

Tabulka 6 – Význam proměnných v cyklu PROBE_CALIB

Vysvětlení parametrů:

`_type: X X X X X`



- 0 - KALIBRACE MONO (DELKA A PRUMER)
- 1 - KALIBRACE MONO I MULTI (DELKA A PRUMER)
- 10 - KALIBRACE MONO S VLASTNIM NATOCENIM C800 (PRUMER POUZE)
- 11 - KALIBRACE MONO I MULTI S VLASTNIM NATOCENIM C800 (PRUMER POUZE)
- 100 - KALIBRACE MONO S VLASTNIM NATOCENIM C800 (DELKA POUZE)
- 101 - KALIBRACE MONO I MULTI S VLASTNIM NATOCENIM C800 (DELKA POUZE)
- 111 - KALIBRACE MULTI S VLASTNIM NATOCENIM C800 (DELKA POUZE)
- 1000 - KALIBRACE MONO (POUZE PRUMER)
- 1001 - KALIBRACE MONO I MULTI (POUZE PRUMER)
- 1100 - KALIBRACE MULTI (PRUMER POUZE)
- 1011 - KALIBRACE MULTI S VLASTNIM NATOCENIM C800 (PRUMER POUZE)
- 10000 - KALIBRACE MONO (DELKA POUZE)
- 10001 - KALIBRACE MONO I MULTI (DELKA POUZE)
- 10011 - KALIBRACE MULTI (DELKA POUZE)

Tabulka 7 – Přehled proměnných parametru `_TYPE`

`_Mode`: výsledná binární kombinace natočení souřadného prostoru převedená v decimální soustavě. Pomocí přiřazení kombinace pro jednotlivé osy: X = 01, Y = 10, Z = 11 (řazeno zprava doleva), lze popsat aktuální natočení souřadného systému:

111001	57	XYZ
110110	54	YXZ
101101	45	XZY
100111	39	ZXY
011110	30	YZX
011011	27	ZYX

Tabulka 8 – Kombinace natočení souřadného systému

Spolu s cyklem `PROBE_CALIB`, je nutno do složky s uživatelskými cykly nahrát, aktivovat a řádně vyplnit i další potřebné podcykly: `PROBE_CONTROL`, `PROBE_DEF`, `PROBE_M_DATA`, `PROBE_MESS`, `PROBE_P_DATA`, `PROBE_POS`, `PROBE_ROT`, `PROBE_WORK`, `PROBE_WORKPIECE_POS`. Po splnění všech těchto podmínek, lze použít cyklus `PROBE_CALIB`.

PROBE_CONTROL

Podcyklus, který slouží pro kontrolu poslední provedené kalibrace. Pokud se neshodují během vyvolání tohoto podcyklu parametry, je obsluha informována o nutnosti provedení kalibrace. Podcyklus lze použít i samostatně, nejen v cyklu PROBE_CALIB.

PROBE_DEF

Podcyklus, který slouží pro definování jednotlivých technologických příslušenství. V tomto smyslu se i krycí rámeček pinoly uvažuje jako technologické příslušenství. Při vyvolání PROBE_CALIB se kontroluje parametr *_HEAD* s daty v tomto podcyklu a pokud nedojde ke shodě, je obsluha stroje upozorněna hlášením o špatně zvoleném typu příslušenství.

```
N60 TZ1:_HEAD_NAME="IWD700_SK2" ; název technologického zařízení
N70  _HEAD_CODE=5 ; kód technologického zařízení
N80  _HEAD_HIRTH=0 ; 1 = TZ s hirthovými spojkami, 0 = automaticky natočitelné TZ
N90  _HEAD_ALLOWED=0 ; 0 = TZ není povoleno pro použití v PROBE_CALIB, 1 = TZ je povoleno
N100 GOTO END
```

PROBE_M_DATA

Podcyklus, ve kterém jsou parametricky definovány bezpečnostní a přejezdové zóny, bezpečné posuvy, toleranční pásma apod.

PROBE_MESS

Podcyklus, ze kterého jsou vyvolávána jednotlivá hlášení v průběhu cyklu PROBE_CALIB. V případě nutnosti lze měnit i jazykové mutace hlášení.

PROBE_P_DATA

Podcyklus, ve kterém jsou datově nastavena kalibrační data pro obrobkovou sondu v jednotlivých režimech (JOG, AUT).

PROBE_POS

Podcyklus, ve kterém jsou parametricky definovány jednotlivé pozice kalibračních děr.

PROBE_ROT

Podcyklus, který slouží pro natočení technologického zařízení na zvolenou pozici kalibračního otvoru. Každý kalibrační otvor má v tomto podcyklu pevně definovanou výchozí kombinaci natočení souřadného systému. V případě technologické nutnosti použití jiné kombinace natočení, lze tyto parametry upravit.

PROBE_WORK

Podcyklus pro výpočet kalibračních parametrů.

PRBE_WORKPIECE_POS

Podcyklus pro variantu použití metody kalibrace přímo na obráběném kuse. Je zde definována poloha kalibračního otvoru, průměr otvoru, bezpečnostní a návratová rovina.

Příklady použití cyklu *PROBE_CALIB*:

1) *Programování kalibrace sondy ve vřetenu stroje, pouze mono kalibrace*

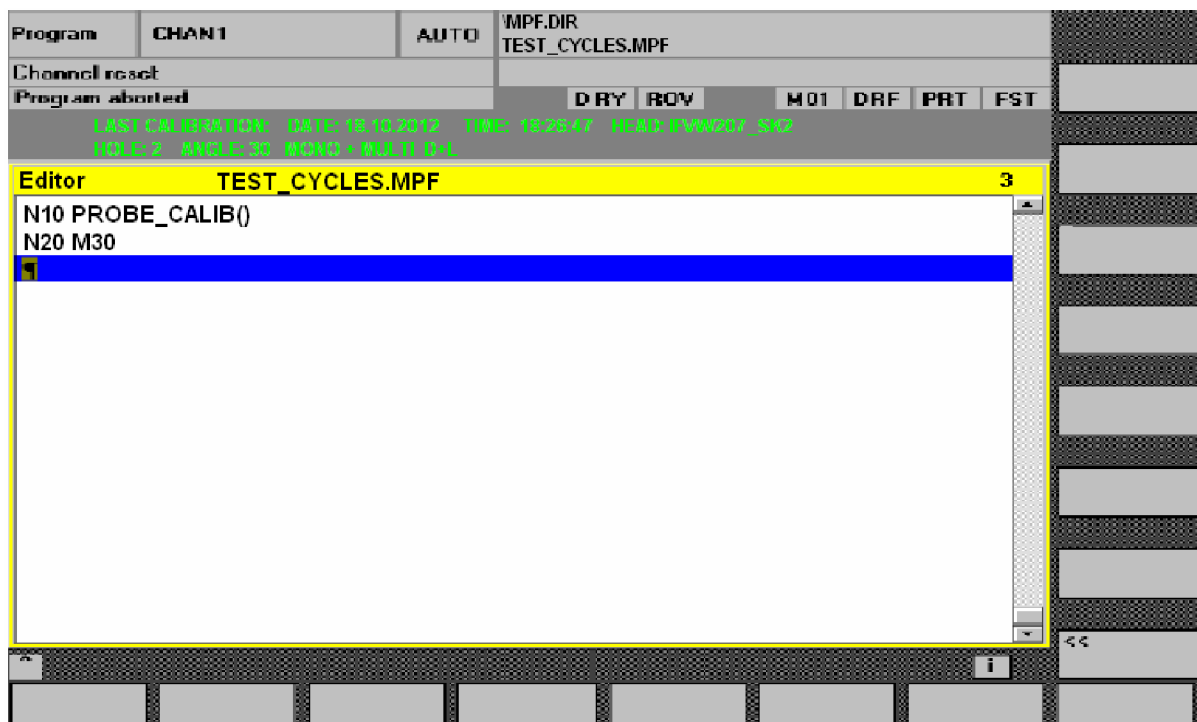
N... ; bloky programu
N... *PROBE_CALIB* ("COVER", 0, 0, 1010, 0, 0)
N... ; pokračování programu

2) *Programování kalibrace sondy s hlavou IFVW102, kalibrace multi i mono*

N... ; bloky programu
N... *PROBE_CALIB* ("IFVW102E", 1, 0, 11000, 0, 0)
N... ; pokračování programu

3) *Kontrola provedené kalibrace*

N... ; bloky programu
N... *PROBE_CALIB* ()
N... ; pokračování programu



Obr. 22 – Příklad vyvolání cyklu *PROBE_CALIB*

Trvalo relativně dlouho přesné pochopení jevu zvaného SKEW a nepřenositelnosti kalibrace mezi jednotlivými TZ. Přesto se na vývoji zmíněného cyklu pokračuje i nadále, neboť je nutné

dořešit např. měření pomocí sondy pod úhlem na tvarové ploše a určení algoritmu kalibrace, či se přizpůsobit příchodu novějších verzí řídicích systémů obráběcích strojů.

Výše uvedený cyklus je jedním ze souboru měřících cyklů, které spolehlivě fungují u několika zákazníků ŠMT. Jejich pravidelným používáním v řádu několika let se dospělo k přesvědčení, že toto řešení bylo správné a nevyhnutelné, a to především s ohledem na dosažitelnost požadovaných tolerancí při různých měřeních a následných vyrovnávání i obrábění.

4.4. Kalibrace kinematických parametrů pro technologická příslušenství

Pro co nejpresnější měření (to samé platí i pro samotné obrábění) s aktivním technologickým příslušenstvím je nutné, aby předtím došlo k jemnému nastavení kinematiky takového příslušenství, tzn., že budou zjištěny všechny příslušné kinematické vektory a posléze zadány do dat stroje, viz Obr. 23 – Kinematické parametry v masce Cycle800 (14). Z praktického hlediska je nutno přihlídnout k tomu, že tyto vektory nejsou časově stálé a jsou ovlivňovány:

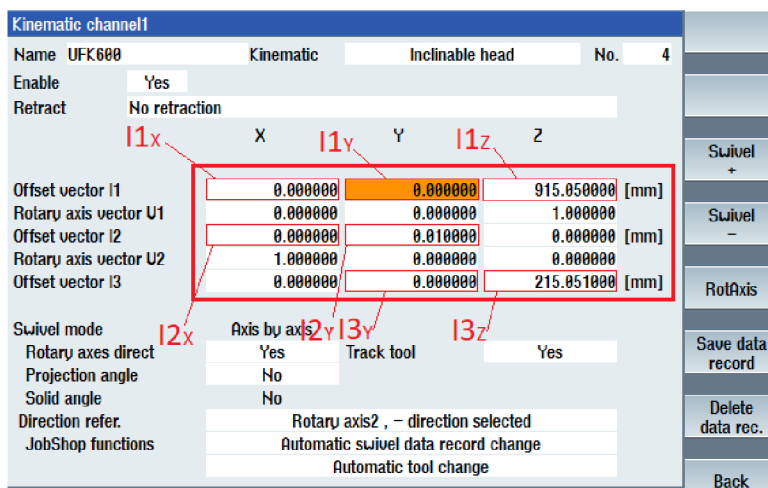
- vlivem teploty okolí, zejména pak ve výrobních halách, které nejsou vybaveny konstantním udržováním teploty (energeticky nákladná záležitost). V technické specifikaci stroje je zpravidla uvedena dovolená změna teploty za časovou jednotku, např. 1 °C/hod. a max. 5 °C/24 hod. Jsou však známy i případy, kdy u konečných uživatelů rozdíly kolísají běžně o více než 20 °C v průběhu dne, případně noci.

- vlivem teploty vznikající zahříváním a chladnutím ložisek, ozubených soukolí a dalších strojních částí v mechanickém hnacím řetězci, jež je závislá na provozních otáčkách vřetena. Zde je zejména problematické jakékoliv přesné měření se sondou upnutou ve vřetenu takového příslušenství, které neproběhne maximálně možné rychle. Je nutno, aby měření probíhalo ideálně za konstantní teploty. Při nasazení elektrovřeten k zahřívání takřka nedochází, nicméně jejich využití na těžkých obráběcích strojích je limitující (omezený kroutící moment, špatně snáší i menší vibrace).

- vlivem prostupu tepla z obráběcího procesu přenášeným skrz obráběcí nástroj. V případě použití chlazení nástroje dochází k eliminaci tohoto jevu, a to jak chladící kapalinou, tak i vzduchem. Podmínkou je však, že chlazení je technologicky žádoucí. V současné době se poměrně často používají obráběcí metody bez chlazení např. HSM, HSC, ...

- vlivem skokových přetížení technologického příslušenství v průběhu obrábění, či případných drobných kolizních situací, majících negativní dopad na geometrii stroje i příslušenství. Po nahlášené / zjištěné "Malé havárii" je nutno nejprve ověřit vliv na geometrii příslušenství a stroje, případně korigovat zpět do povolených protokolárních tolerancí.

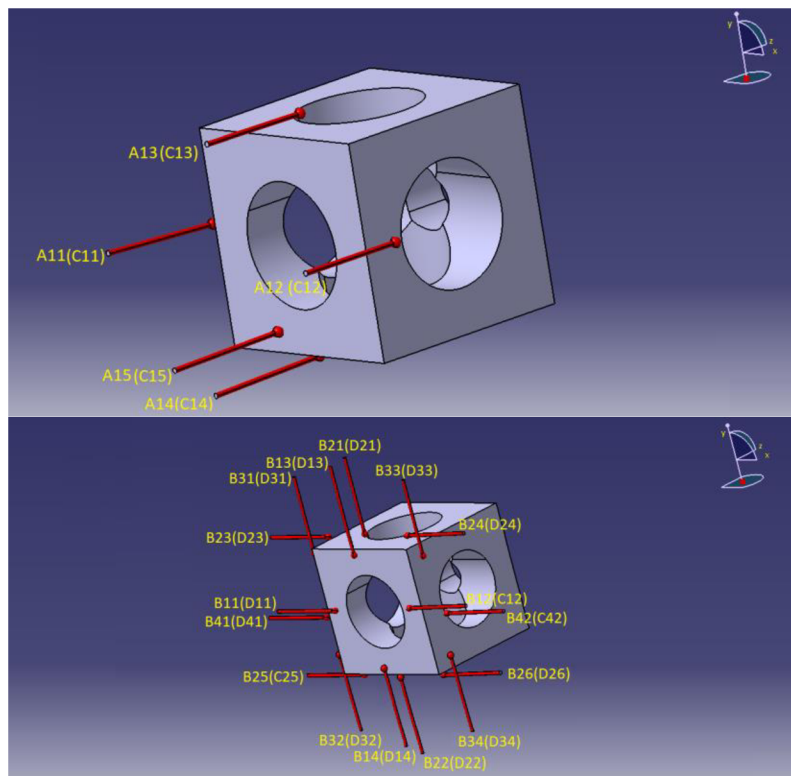
Na základě výše uvedeného rozdělení je patrné, že v systému zadané vektory je radno nepodceňovat, a naopak vyžadovat jejich periodickou kontrolu a dbát na preciznost provedení. Z těchto důvodů byl ke kalibračnímu cyklu sondy vytvořen podcyklus pro automatickou kompenzaci technologických zařízení.



Obr. 23 – Kinematické parametry v masce Cycle800

4.4.1 Popis cyklu HEAD_CALIB

Pomocí cyklu je možno provést kontrolu, případně korekci kinematických dat pro jednotlivá technologická zařízení. K tomuto účelu se používá kalibrační stojánek a řádně provedená kalibrace obrobkové sondy – cyklus automaticky kontroluje provedení poslední platné kalibrace sondy, v případě zjištění rozdílu použitých TZ je obsluha stroje upozorněna na provedení nové kalibrace sondy a cyklus je zastaven. Nutností před prvním použitím je, aby byla v systému vytvořena kompenzační tabulka a předvyplněná alespoň základní kompenzační data (stačí doplnit teoretické míry z montážního výkresu daného TZ). Vlastní měření probíhá schematicky podle následujících obrázků, viz Obr. 24 – Schéma měření.



Obr. 24 – Schéma měření

Z jednotlivých pozic měření se zjišťují odchylky (zařízení, u kterých lze stejnou pozici dosáhnout dvěma natočeními, jsou měřené body označeny C a D) od skutečné polohy, z nichž se následně dopočítají kinematické vektory $I1_x$, $I1_y$, $I1_z$, $I2_x$, $I2_y$, $I3_y$ a $I3_z$, a to následujícím způsobem:

$$I1_x = \frac{A_{11} + A_{12} + B_{31} + B_{32} + B_{33} + B_{34}}{6} \quad (1)$$

$$I1_y = \frac{A_{13} + A_{14} + B_{23} + B_{24} + B_{25} + B_{26}}{6} \quad (2)$$

$$I1_z = \frac{D_{11} - \left(\frac{B_{11} - D_{11}}{2}\right) + D_{12} - \left(\frac{B_{12} - D_{12}}{2}\right) + D_{13} - \left(\frac{B_{13} - D_{13}}{2}\right) + D_{14} - \left(\frac{B_{14} - D_{14}}{2}\right)}{4} \quad (3)$$

$$I2_x = \frac{A_{11} + A_{12} + B_{24} + B_{26} + B_{32} + B_{34}}{6} \quad (4)$$

$$I2_y = \frac{A_{13} + A_{14} + B_{21} + B_{22} + B_{41} + B_{42}}{6} \quad (5)$$

$$I3_y = \frac{\left(\frac{B_{11} - D_{11}}{2}\right) + \left(\frac{B_{12} - D_{12}}{2}\right) + \left(\frac{B_{13} - D_{13}}{2}\right) + \left(\frac{B_{14} - D_{14}}{2}\right)}{4} \quad (6)$$

$$I3_z = \frac{I3_{za} + I3_{zb} + I3_{zc} + I3_{zd}}{4} \quad (7)$$

$$I3_{za} = A_{15} - \left(D_{11} + \left(\frac{B_{11} - D_{11}}{2}\right)\right) \quad (8)$$

$$I3_{zb} = A_{15} - \left(D_{12} + \left(\frac{B_{12} - D_{12}}{2}\right)\right) \quad (9)$$

$$I3_{zc} = A_{15} - \left(D_{13} + \left(\frac{B_{13} - D_{13}}{2} \right) \right) \quad (10)$$

$$I3_{zd} = A_{15} - \left(D_{14} + \left(\frac{B_{14} - D_{14}}{2} \right) \right) \quad (11)$$

Jednotlivé výše uvedené vztahy a způsob jejich výpočtu byly získány na základě většího počtu měření a jsou odvozeny empiricky. Cyklus HEAD_CALIB využívá některé pomocné cykly pro kalibraci sondy.

HEAD_CALIB (_Head,_Mode)

_Head	string	Použité technologické příslušenství
_Mode	integer	Zvolená metoda měření

Tabulka 9 – Význam proměnných v cyklu HEAD_CALIB

Vysvětlení parametrů:

_Head - použité zařízení (musí být uvedeno v cyklu PROBE_DEF)

_Mode - 0 - měření pomocí obrobkové sondy s přepsáním kinematické tabulky

1 - měření pomocí obrobkové sondy bez přepsání kinematické tabulky

2 - měření pomocí nespínací sondy (3D taster)

Příklady použití cyklu HEAD_CALIB:

1) Programování kalibrace TZ IFVW207 s přepsáním kinematické tabulky

N... ; bloky programu

N... HEAD_CALIB ("IFVW207S_SK1", 0)

N... ; pokračování programu

2) Programování kalibrace TZ IFVW207 pomocí nespínací sondy

N... ; bloky programu

N... HEAD_CALIB ("IFVW207S_SK1", 2)

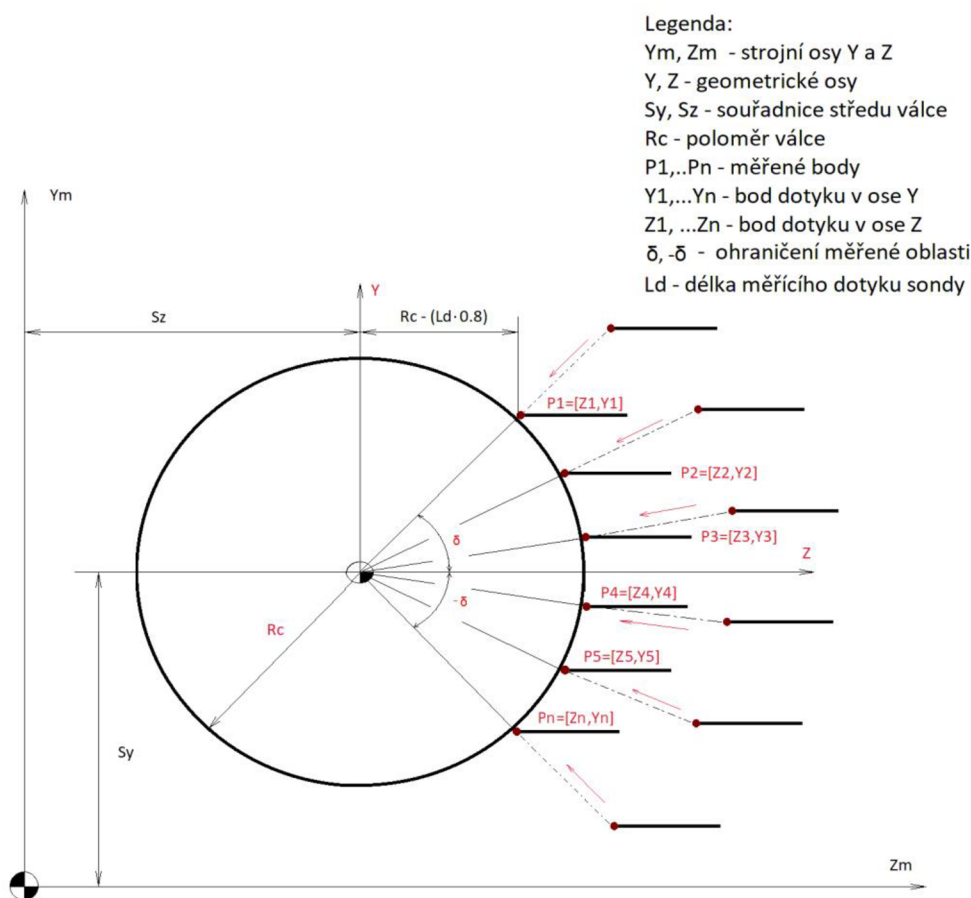
N... ; pokračování programu

V tomto případě je po dojetí na předpokládanou pozici běh cyklu zastaven pomocí M0 a obsluha stroje je vyzvána, aby odečetla naměřenou hodnotu a zaznamenala vše do tabulky. Po dokončení cyklu je nutné v GUD datech vyplnit příslušné parametry $I1_x$ $I3_{zd}$ a spustit znovu cyklus se stejnými parametry. Tímto dojde k přepočtu naměřených hodnot a přepsání

dané kinematické tabulky – takovýto způsob měření je vhodný při konfiguraci stroje, který není vybaven obrobkovou sondou, ale pouze 3D testerem, ale správné použití závisí na lidském faktoru (zejména na pečlivosti a svědomitosti obsluhy stroje).

4.5. Měření neúplného kruhu

Za předpokladu řádně zkalibrované obrobkové sondy a zakoupených licencí pro měřící cykly i tak není možné obsáhnout všechny případy měření. Takovým příkladem může být např. zaměření středu válce kontaktními body na jeho obvodu, viz Obr. 25 – Měření válce.



Obr. 25 – Měření válce

Zde dochází k situaci, kdy je sonda zkalibrovaná na délku, ale bod doteku (mezi obrobkem a sondou) není totožný s bodem doteku sondy v kalibračním místě. V některých případech je nutné, aby měření sondou bylo vykonáno pohybem více než jedné osy, tzn. dochází k interpolaci dvou nebo více os, zatímco kalibrace tímto způsobem není možná z důvodu neúplné definice kalibrační plochy vůči stroji. Prakticky je tedy nutné, aby došlo k přepočtení spínacích bodů na doteku sondy, které se následně projeví např. v parametrech délky a průměru doteku, jež jsou použity k vlastnímu měření. Tímto způsobem lze zaměřit vlastní body na povrchu válce, avšak z důvodu přesnosti jich musí být více než-li tři (střed kruhu lze vypočítat minimálně pomocí tří bodů), a to ideálně minimálně pět. Postup výpočtu středu kruhu (15):

$$(Z_i - S_z)^2 + (Y_i - S_y)^2 = R_c^2 \quad (12)$$

$$(Z_1 - S_z)^2 + (Y_1 - S_y)^2 = R_c^2 \quad (13)$$

$$(Z_2 - S_z)^2 + (Y_2 - S_y)^2 = R_c^2 \quad (14)$$

$$(Z_2 - S_z)^2 + (Y_2 - S_y)^2 = R_c^2 \quad (15)$$

$$(Y_3^2 + Z_3^2) - (Y_1^2 + Z_1^2) - 2S_z(Y_3 - Y_1) - 2S_y(Z_3 - Z_1) = 0 \quad (16)$$

$$(Y_3^2 + Z_3^2) - (Y_2^2 + Z_2^2) - 2S_z(Y_3 - Y_2) - 2S_y(Z_3 - Z_2) = 0 \quad (17)$$

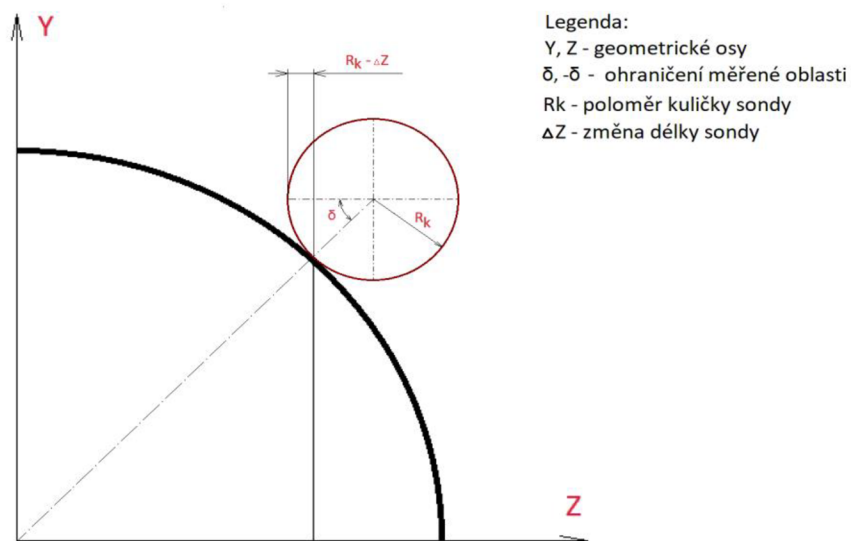
$$S_z = \frac{(Y_3^2 + Z_3^2) - (Y_2^2 + Z_2^2) - 2S_y(Z_3 - Z_2)}{(Y_3 - Y_2)} \quad (18)$$

$$S_y = \frac{(Y_3^2 + Z_3^2) - (Y_1^2 + Z_1^2) - \frac{Y_3 - Y_1}{Y_3 - Y_2} ((Y_3^2 + Z_3^2) - (Y_2^2 + Z_2^2))}{2(Z_3 - Z_1) - \frac{2(Y_3 - Y_1)(Z_3 - Z_1)}{(Y_3 - Y_1)}} \quad (19)$$

$$R_c = \sqrt{(Y_1 - S_z)^2 + (Z_1 - S_y)^2} \quad (20)$$

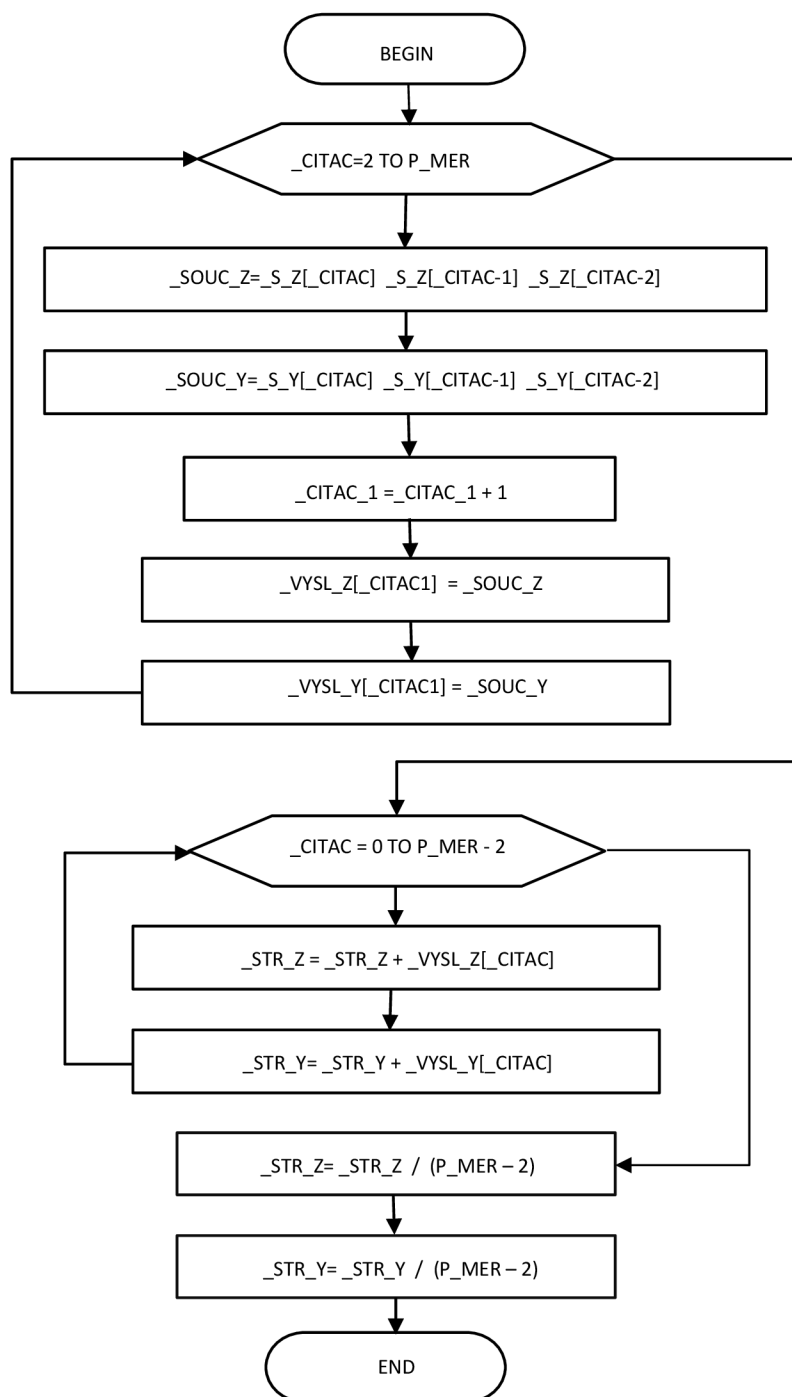
$$\alpha = \arctg\left(\frac{S_y}{S_z}\right) \quad (21)$$

Při měření válců velkých průměrů (bez použití TZ) může dojít ke kolizi tělesa měřící sondy s obrobkem. Proto je rozsah měření omezen na 80% délky měřícího doteku. Tím vznikne oblast (ohraňovaná úhlem δ), ve které lze provést bezpečné měření. U tohoto typu měření je zanášena do procesu chyba měření, jelikož místo kontaktu měřící sondy s měřeným obrobkem je jiné, než při kalibraci – viz Obr. 26 – Kontaktní bod při měření válce.



Obr. 26 – Kontaktní bod při měření válce

Délka měřicí sondy proto musí být u každého měřeného bodu upravena o ΔZ . Pro takovéto tangenciální měření válce je nutné, aby v bezpečné oblasti měření bylo pro určení co nejpřesnější polohy středu naměřeno minimálně 5 bodů. Z těchto bodů se pomocí střední hodnoty vypočte střed válce. Algoritmus výpočtu středu kruhu:



Obr. 27 – Vývojový diagram

Význam jednotlivých proměnných:

<code>_CITAC:</code>	<i>int</i>	<i>proměnná je použita jako počítadlo pro příkaz for-endfor. Záměrně začíná _CITAC=2, jelikož střed kruhu lze vypočítat ze tří proměnných</i>
<code>_CITAC_1:</code>	<i>int</i>	<i>proměnná je použita jako počítadlo pro příkaz for-endfor</i>
<code>P_MER:</code>	<i>int</i>	<i>proměnná je použita jako počet provedených měření</i>
<code>_SOUC_Y:</code>	<i>real</i>	<i>proměnná je použita pro provedení součtu všech středů v ose Y</i>
<code>_SOUC_Z:</code>	<i>real</i>	<i>proměnná je použita pro provedení součtu všech středů v ose Z</i>
<code>_STR_Y:</code>	<i>real</i>	<i>proměnná použita jako výsledek středu válce v ose Y</i>
<code>_STR_Z:</code>	<i>real</i>	<i>proměnná použita jako výsledek středu válce v ose Y</i>
<code>_S_Y:</code>	<i>array</i>	<i>proměnná typu pole použita jako pole všech naměřených středů v ose Y</i>
<code>_S_Z:</code>	<i>array</i>	<i>proměnná typu pole použita jako pole všech naměřených středů v ose Z</i>
<code>_VYSL_Y:</code>	<i>array</i>	<i>proměnná použita jako uložení přepočtených středů v ose Y</i>
<code>_VYSL_Z:</code>	<i>array</i>	<i>proměnná použita jako uložení přepočtených středů v ose Z</i>

4.6. Měření pomocí obrobkových sond v obecné rovině

V rámci příprav k řešení úkolu zaměření polohy rozměrného obrobku existují primárně dva možné případy:

- souřadný systém obrobku se vyrovná do polohy odpovídající souřadnému systému obráběcího stroje, a následně je obrobek fixován – upnut
- obrobek je upnut v neznámé poloze a souřadný systém obráběcího stroje je následně natočen souhlasně se souřadným systémem obrobku

4.6.1 Souřadný systém obrobku je přizpůsoben souřadnému systému stroje

Obrobek je volně ustaven v pracovním prostoru stroje a následně je vyrovnán buď manuálně nebo automaticky (v případě použití sofistikovaných přípravků) do polohy, kdy jsou osy obrobku paralelní s osami stroje. Následně je obrobek upnut a jeho poloha znovu zkontrolována pro případ tzv. prošponování či jiného pohybu. Typickým příkladem mohou být např. rotory pro turbíny či generátory o váze dosahující až několika set tun, viz Obr. 28 – Obrábění rotoru plynové turbíny. Zde se nabízí možnost na plnou automatizaci měření a zároveň i na plnou automatizaci vyrovnání. Měření polohy takového rotoru je provedeno v základním souřadném systému stroje, kdy se zjišťuje rozdíl dvou bodů o známé vzdálenosti, ve vertikálním i horizontálním směru doteku. Je zde nutno počítat i s prohýbáním obrobku, které je způsobeno vlastní vahou. Po “dokonalém” vyrovnání (nulové hodnoty v tomto případě neexistují, resp. jsou s časem proměnné, a to v závislosti na teplotách, době upnutí,

řezných silách, tzv. rozevírání rotorů vlivem odebraného materiálu atd.) následuje zaměření nulového bodu obrobku umístěného zpravidla v ose obrobku na jednom z jeho konců.



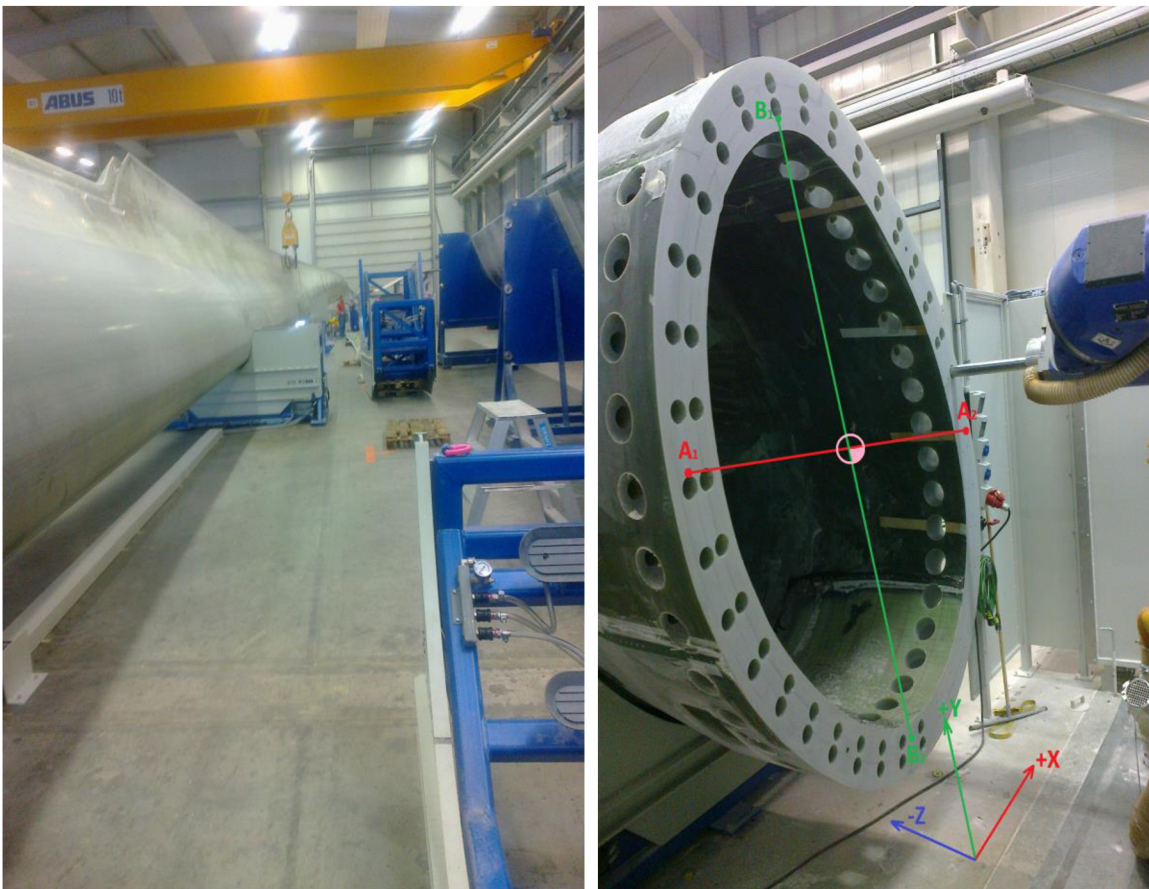
Obr. 28 – Obrábění rotoru plynové turbíny

4.6.2 Souřadný systém stroje je přizpůsoben souřadnému systému obrobku

Obrobek je upnut v pracovním prostoru stroje v neurčité poloze, resp. opakovatelnost jeho upnutí není zaručena z důvodů např. rozměrnosti, neopracovanosti ploch, odchýlných rozměrů atd. Svoji roli může hrát i počet stejných kusů daného obrobku v případě opakované kusové či dokonce sériové výroby, a s tím související (ne)návratnost investovaných finančních prostředků do upínacích přípravků a automatizovaných měřících systémů.

Typickým příkladem může být i dutý obrobek válcovitého či elipsoidního tvaru, kdy jsou vnější rozměrné plochy zhotoveny v odchýlkách řádu jednotek mm, avšak vzdálenost dvou upínacích přípravků je vícero desítek metrů. Volné konce obrobku, jež jsou obráběny, mohou pak i při zdánlivě naprosto totožné poloze upnutí činit odchylky o dva řády vyšší – tedy několika set mm, a naklonění v řádu jednotek stupňů vůči všem vektorům kartézského souřadného systému stroje. Zde lze použít relativně nákladné statické či mobilní skenovací systémy s dlouhou dobou měření a výstupem výsledků s přesností 0,005 mm a 0,002°. Naproti tomu se nabízí využití standardní obrobkové sondy – za předpokladu, kdy je obrobek na stroj dopraven již s předhrubovaným koncem / přírubou z předchozího výrobního procesu a lze ji využít jako vztažnou rovinu.

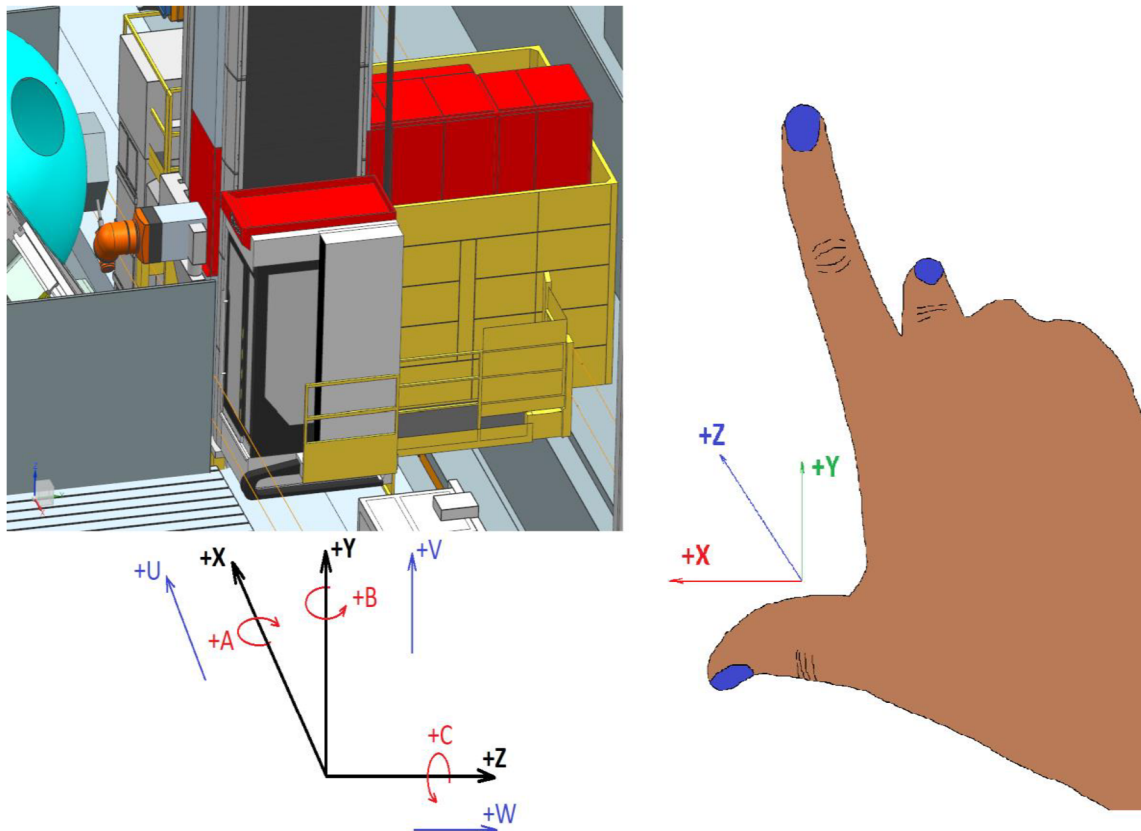
Měření sklonu takové příruby je provedeno v základním souřadném systému stroje, tzn. postačí jeho tři lineární nenaklonené osy. K tomu je použito dvou měřících bodů v ose X a dvou v ose Y o známých vzdálenostech odečtených z měřícího systému stroje. K tomu lze využít standardní měřící cykly buď v ručním nebo automatickém cyklu stroje, viz Obr. 29 – Obrábění příruby lopatky větrné turbíny. Výsledné generované hodnoty dvou úhlů jsou používány pro transformační cyklus, jež postaví osu nástroje – obrobkové sondy kolmo na plochu nakloněné roviny. V této rovině lze zaměřit natočení obrobku kolem nově vzniklé geometrické osy Z, za předpokladu existujících vztažných bodů. Pakliže tyto body nelze jednoznačně určit, nabízí se použití šablony upnuté do vřetena namísto nástroje, která odhalí žádoucí stav předem známé kontury (je závislé na požadované/akceptovatelné toleranci). Tím dochází k získání hodnot třech úhlů, které jsou následně použity jako vstupní parametry do transformačního cyklu, jež přepočítá vztah mezi rotacemi.



Obr. 29 – Obrábění příruby lopatky větrné turbíny

4.6.3 Přepočítání transformací

Ve strojírenské praxi je zavedeno, že se pro určení polohy bodu nebo objektu používá polární či kartézské zadání (16) (17) (18). Nejčastěji se lze setkat s kartézským souřadným systémem, kdy jsou jednotlivé souřadné osy v prostoru na sebe vzájemně kolmé přímkami, které se protínají v jednom bodě, tzv. počátku souřadného systému. Dle ISO norem (DIN66217) tedy každý souřadný systém stroje musí být ortogonální (pravoúhlý), pravotočivý (rotace kolem jednotlivých os je dána pravidlem pravé ruky) a osa Z by měla zůstat vždy osou rotačního nástroje (toto pravidlo musí platit i po výsledné transformaci), viz Obr. 30 – Pravidlo pravé ruky. (14)



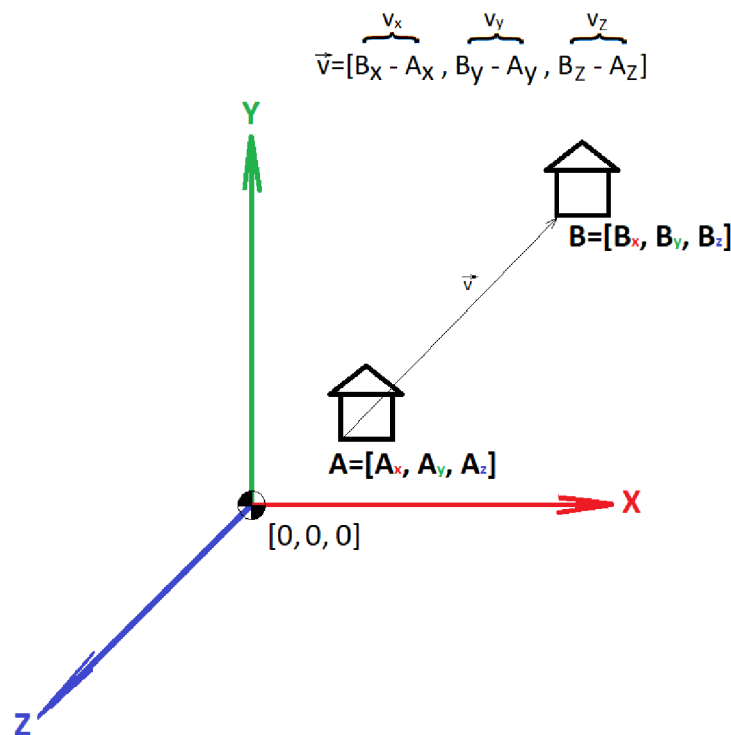
Obr. 30 – Pravidlo pravé ruky

Transformace souřadnic je proces, kdy dochází k přechodu od jedné soustavy souřadnic ke druhé, a to bez změny velikosti nebo tvaru otáčeného tuhého tělesa (tuhým tělesem se rozumí idealizovaná soustava bodů, pro které platí, že vzdálenost dvou vybraných bodů během i po dokončení transformací zůstává stejná). Transformacemi souřadnic se v těchto případech rozumí změna orientace tělesa vzhledem k původní bázi. K matematickému vyjádření se používají transformační matice. Ty realizují obecně tři rotace pevného tělesa a zároveň jeho posunutí (translaci). (19) (20) (18)

Transformace pomocí posunutí

Posunutí je definováno tak, že každý daný bod objektu se zobrazí na nový bod posunutý o stejný vektor, čímž se vyjadřuje posun celého tělesa, viz Obr. 31 – Transformace pomocí posunutí. Operace posunutí se realizuje přenásobením rozšířeného vektoru souřadnic translační maticí ve tvaru: (19) (21) (20) (17)

$$\begin{pmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & 0 & V_Y \\ 0 & 0 & 1 & V_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \\ A_Z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (22)$$



Obr. 31 – Transformace pomocí posunutí

kde A_x, A_y, A_z představují souřadnice původního bodu a B_x, B_y, B_z souřadnice bodu po posunutí. Rozšíření matic a vektorů o hodnotu 1 v poslední řádce je zde zavedeno uměle a vede na přirozenou podmínku translace:

$$\begin{pmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \\ A_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Samotnou translační matici lze rozložit na součin matic:

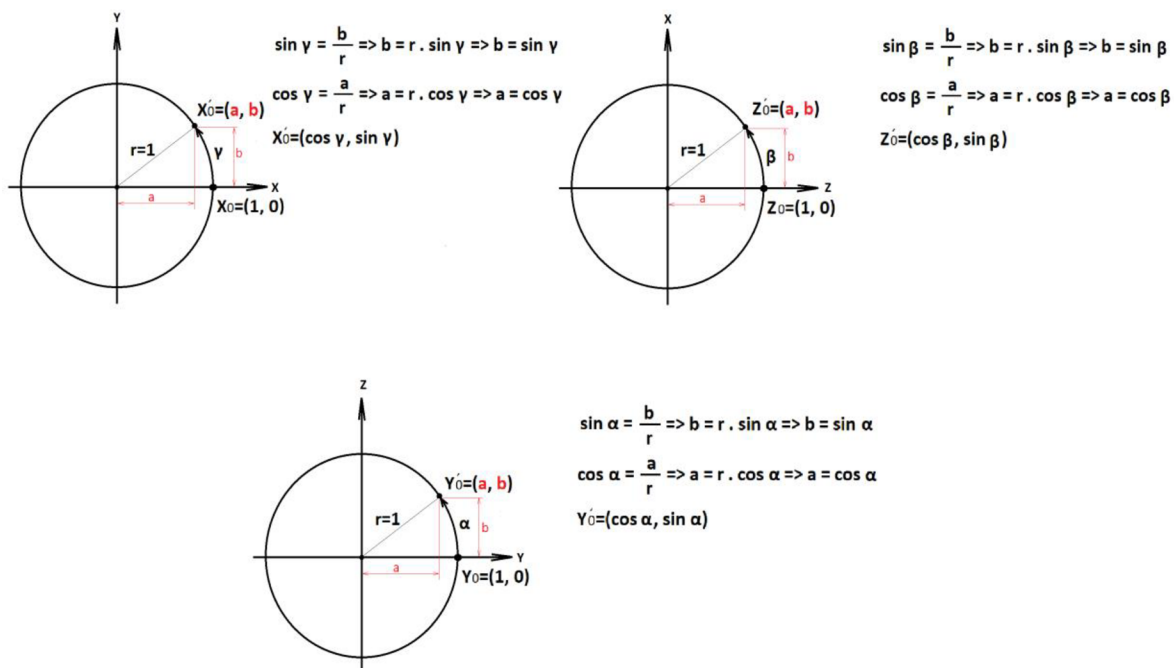
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & 0 & V_Y \\ 0 & 0 & 1 & V_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & V_Y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & V_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

kde jednotlivé matice na pravé straně lze násobit v libovolném pořadí, tedy matice vzhledem k násobení komutují. Matice posunutí má pak tvar: (18)

$$P_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & 0 & V_Y \\ 0 & 0 & 1 & V_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Transformace pomocí rotace

Rotace je definována jako otočení objektu nebo souřadného systému o daný úhel kolem pevného bodu (platí v rovině) nebo osy v případě prostoru. Příklad rovinné rotace na jednotkové kružnici je vysvětlen na následujícím obrázku, viz Obr. 32 – Transformace pomocí rotace. V obecném případě rotace v prostoru s k popisu používají jednotlivé rotační matice: (19) (21) (20) (17)



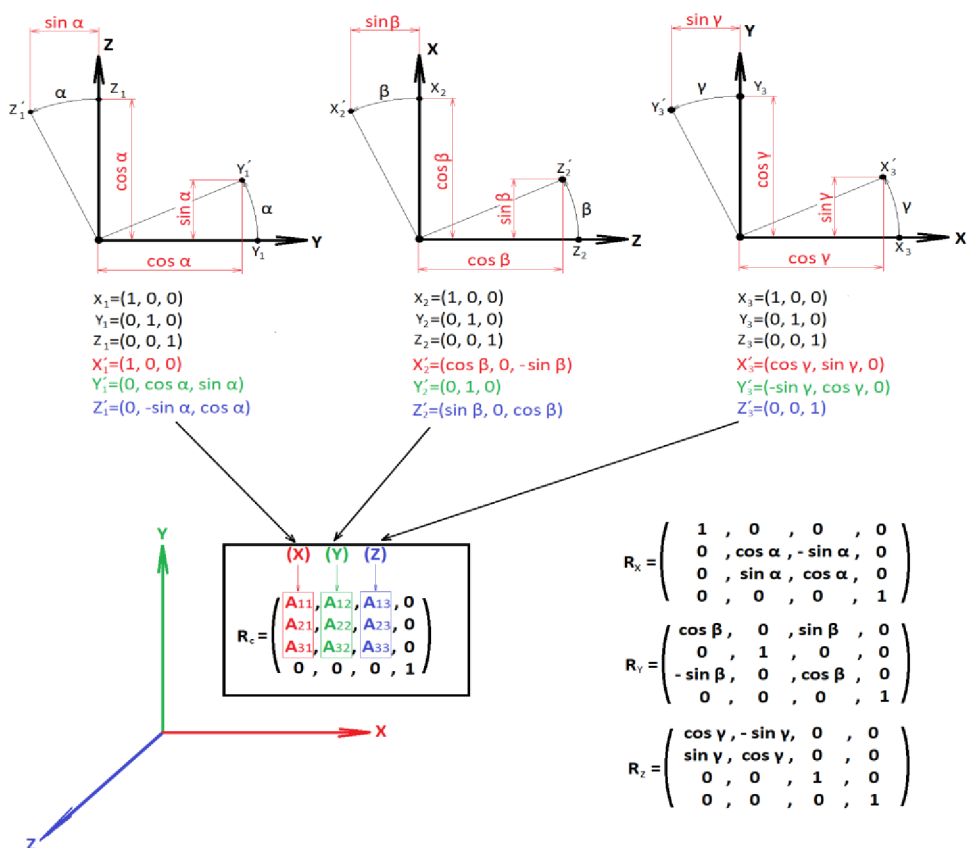
Obr. 32 – Transformace pomocí rotace

$$R_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$R_Y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$R_Z = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

Princip sestavení rotačních matic je patrný z následujícího obrázku, viz Obr. 33 – Sestavení jednotlivých rotací.



Obr. 33 – Sestavení jednotlivých rotací

Výsledná rotační matice je dána součinem dílčích matic uvedených výše ve specifickém pořadí. Na rozdíl od translačních matic na pořadí v součinu záleží a matice tedy nekomutují. Pokud se provede například rotace nejdříve kolem osy X (o úhel α), poté kolem osy Y (o úhel β) a nakonec kolem osy Z (o úhel γ), je celková rotační matice R_C dána součinem: (19) (21) (20) (17)

$$R_C = R_{XYZ} = R_Z \cdot R_Y \cdot R_X. \quad (29)$$

Jednotlivé rotační matice se umísťují zprava doleva a celková rotační matice R_C reprezentuje jejich součin:

$$R_{XYZ} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (30)$$

který je možno dále roznásobit. K tomu je výhodné označit \sin a \cos vstupujících úhlů jako koeficienty:

$$\cos \alpha = c_1, \sin \alpha = s_1, \cos \beta = c_2, \sin \beta = s_2, \cos \gamma = c_3, \sin \gamma = s_3. \quad (31)$$

Za pomoci těchto označení se zápis celkové rotační matice (30) zjednoduší na tvar:

$$R_{XYZ} = \begin{pmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_2 & 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_2 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & -s_1 & 0 \\ 0 & s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (32)$$

Roznásobením tedy vychází:

$$R_{XYZ} = \begin{pmatrix} c_2 c_3 & c_3 s_1 s_2 - c_1 s_3 & s_1 s_3 + c_1 c_3 s_2 & 0 \\ c_2 s_3 & c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3 & c_1 s_2 s_3 - c_3 s_1 & 0 \\ -s_2 & c_2 s_1 & c_1 c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Ostatní možnosti natočení (celkem existuje 6 permutací ze tří indexů X, Y, Z) po roznásobení vypadají takto:

$$R_{ZYX} = \begin{pmatrix} c_3 c_2 & -c_2 s_3 & s_2 & 0 \\ c_1 s_3 + c_3 s_1 s_2 & c_1 c_3 - s_1 s_2 s_3 & -c_2 s_1 & 0 \\ s_1 s_3 - c_1 c_3 s_2 & c_3 s_1 + c_1 s_3 s_2 & c_1 c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$R_{YZX} = \begin{pmatrix} c_3 c_2 & -s_3 & c_3 s_2 & 0 \\ c_1 c_2 s_3 + s_1 s_2 & c_1 c_3 & -c_2 s_1 + c_1 s_3 s_2 & 0 \\ c_2 s_1 s_3 - c_1 s_2 & c_3 s_1 & c_1 c_2 + s_1 s_3 s_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (35)$$

$$R_{XZY} = \begin{pmatrix} c_3 c_2 & -c_1 c_2 s_3 + s_1 s_2 & c_2 s_1 s_3 + c_1 s_2 & 0 \\ s_3 & c_1 c_3 & -c_3 s_1 & 0 \\ -c_3 s_2 & c_2 s_1 + c_1 s_3 s_2 & c_1 c_2 - s_1 s_3 s_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (36)$$

$$R_{ZXY} = \begin{pmatrix} c_3 c_2 + s_1 s_2 s_3 & -c_2 s_3 + c_3 s_1 s_2 & c_1 s_2 & 0 \\ c_1 s_3 & c_1 c_3 & -s_1 & 0 \\ c_2 s_1 s_3 - c_3 s_2 & c_3 c_2 s_1 + s_3 s_2 & c_2 c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (37)$$

$$R_{YXZ} = \begin{pmatrix} c_3 c_2 - s_1 s_2 s_3 & -c_1 s_3 & c_3 s_2 + c_2 s_1 s_3 & 0 \\ c_2 s_3 + c_3 s_1 s_2 & c_1 c_3 & s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1 & 0 \\ -c_1 s_2 & s_1 & c_1 c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (38)$$

Pro rotační matice platí několik základních pravidel: (22) (23) (24)

- musí být ortonormální – tzn., že dva libovolně na tělese zvolené vektory musí po transformaci zachovat jejich vzájemný úhel. Takové matice jsou automaticky regulární, tedy invertovatelné
- musí existovat inverzní matice i transformace, tj., že musí být zachována možnost návratu do výchozí polohy a inverzní matice je rovna transpozici původní matice

- při rotaci o nulový úhel musí vždy vyjít jednotková matice. Při složené rotaci o nulový úhel tedy také musí vyjít jednotková matice (jelikož násobením jednotkové matice další jednotkovou maticí vyjde opět jednotková matice)

$$R_{X(0)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$R_{Y(0)} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (40)$$

$$R_{Z(0)} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (41)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (42)$$

Pro jednotlivé rotační matice platí tedy: (19)

$$R_X^{-1} = R_X^T, \quad (43)$$

$$R_Y^{-1} = R_Y^T, \quad (44)$$

$$R_Z^{-1} = R_Z^T. \quad (45)$$

Například pro celkovou rotační matici R_C v příkladu výše platí v důsledku známých algebraických vztahů rovnost: (19)

$$R_C^{-1} = (R_Z R_Y R_X)^{-1} = R_X^{-1} R_Y^{-1} R_Z^{-1} = R_X^T R_Y^T R_Z^T = (R_Z R_Y R_X)^T = R_C^T, \quad (46)$$

a tedy je také ortonormální.

Příklad:

Jsou dány postupné rotace v pořadí: o $\alpha=30^\circ$ kolem osy X, o $\beta=45^\circ$ kolem osy Y a o $\gamma=60^\circ$ kolem osy Z. Tomu odpovídají parametry: $c_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $s_1 = \frac{1}{2}$, $c_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $s_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $c_3 = \frac{1}{2}$, $s_3 = \frac{\sqrt{3}}{2}$ a výsledná rotační matice po roznásobení:

$$R_{XYZ} = \begin{pmatrix} 0,3536 & -0,5732 & 0,7392 & 0 \\ 0,6124 & 0,7392 & 0,2803 & 0 \\ -0,7071 & 0,3536 & 0,6124 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (47)$$

Lze jednoduše ověřit, že transpozice matice R_C výše je rovna inverzi této matice, tj.

$$R_{XYZ}^{-1} = R_{XYZ}^T = \begin{pmatrix} 0,3536 & 0,6124 & -0,7071 & 0 \\ -0,5732 & 0,7392 & 0,3536 & 0 \\ 0,7392 & 0,2803 & 0,6124 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (48)$$

a tedy platí:

$$R_{XYZ}^T \cdot R_{XYZ} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (49)$$

$$R_{XYZ} \cdot R_{XYZ}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (50)$$

Výše uvedený příklad popisuje výslednou rotační matici, která je sestavená postupně z dílčích rotací kolem os spjatých s původním souřadným systémem (myšleno vždy k jednotlivým osám souřadného systému stroje). Stejnou rotační matici lze sestavit ekvivalentně z dílčích rotací kolem os spjatých s rotujícím tělesem (myšleno vždy postupná rotace osy po ose, tzn. jednotlivé natáčení systému geometrických os). U první varianty os spjatých s původním souřadným systémem se hovoří o tzv. **vnějších rotacích** (z anglického jazyka extrinsic rotations), u druhé varianty os spjatých s rotujícím tělesem se hovoří o tzv. **vnitřních rotacích** (z anglického jazyka intrinsic rotations). Podstatným rozdílem při sestavování výsledné rotační matice je jednotlivé pořadí dílčích rotačních matic vstupujících do součinu a platí: (22) (25)

- při vnějších rotacích se násobí matice zprava doleva, úhly jsou značeny α, β, γ
- při vnitřních rotacích se násobí matice zleva doprava, úhly jsou značeny α', β', γ'

	Vnější rotace	Vnitřní rotace
Rotace kolem osy X	$R_X(\alpha)$	$R'_X(\alpha')$
Rotace kolem osy Y	$R_Y(\beta)$	$R'_Y(\beta')$
Rotace kolem osy Z	$R_Z(\gamma)$	$R'_Z(\gamma')$

Tabulka 10 – Značení dílčích rotací

Platí tedy následující příklad značení dílčích a celkových matic pro vnější a vnitřní rotace:

$$R_{XYZ}(\alpha \beta \gamma) = R_Z(\gamma) \cdot R_Y(\beta) \cdot R_X(\alpha) \quad (51)$$

$$R'_{XYZ}(\alpha' \beta' \gamma') = R'_X(\alpha') \cdot R'_Y(\beta') \cdot R'_Z(\gamma') \quad (52)$$

Výslednou rotační matici například pro permutaci ZXY je možné odvodit pomocí postupných vnitřních rotací Z-X-Y. Symbol Z-X-Y znamená nejdříve rotaci kolem osy Z, poté kolem osy X a nakonec kolem osy Y. Pro vyjádření úhlů α', β', γ' tak platí:

$$R'_{ZXY} = \begin{pmatrix} \cos \gamma' & -\sin \gamma' & 0 & 0 \\ \sin \gamma' & \cos \gamma' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha' & -\sin \alpha' & 0 \\ 0 & \sin \alpha' & \cos \alpha' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta' & 0 & \sin \beta' & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta' & 0 & \cos \beta' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (53)$$

Hodnoty \sin a \cos úhlů vystupujících výše se označí jako koeficienty:

$$\cos \alpha' = c_1', \sin \alpha' = s_1', \cos \beta' = c_2', \sin \beta' = s_2', \cos \gamma' = c_3', \sin \gamma' = s_3', \quad (54)$$

přičemž zavedené značení se použije i pro ostatní permutace indexů. Například je tedy možné matici (53) přepsat jako

$$R'_{ZXY} = \begin{pmatrix} c_3' & -s_3' & 0 & 0 \\ s_3' & c_3' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_1' & -s_1' & 0 \\ 0 & s_1' & c_1' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_2' & 0 & s_2' & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_2' & 0 & c_2' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (55)$$

a jejím roznásobením vychází:

Z-X-Y:

$$R_{ZXY}' = \begin{pmatrix} c_3'c_2' - s_1' s_2' s_3' & -c_1' s_3' & c_3' s_2' + c_2' s_1' s_3' & 0 \\ c_2' s_3' + c_3' s_1' s_2' & c_1' c_3' & s_2' s_3' - c_2' c_3' s_1' & 0 \\ -c_1' s_2' & s_1' & c_1' c_2' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (56)$$

Pokud by byla matice R_{ZXY}' dána přímo hodnotami jejích prvků , tj.:

$$R_{ZXY}' = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (57)$$

Ize využitím vhodných pozic v matici najít přímo vzorce pro úhly α' , β' , γ' . Pro pohodlnost byly odpovídající pozice v maticích barevně odlišeny (platí pouze pro natočení Z-X-Y, odvození pro zbylé permutace je uvedeno níže v textu):

$$\alpha' = \arcsin(A_{32})$$

$$\beta' = -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{31}}{A_{33}}\right) \quad (58)$$

$$\gamma' = -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{12}}{A_{22}}\right)$$

Pro vyjádření ostatních pěti permutací natočení prostoru pomocí vnitřních rotací platí následující výsledné rotační matice R_C' a úhly α' , β' , γ' :

X-Y-Z:

$$R_{XYZ}' = \begin{pmatrix} c_3'c_2' & -c_2' s_3' & s_2' & 0 \\ c_1' s_3' + c_3' s_1' s_2' & c_1' c_3' - s_1' s_2' s_3' & -c_2' s_1' & 0 \\ s_1' s_3' - c_1' c_3' s_2' & c_3' s_1' + c_1' s_3' s_2' & c_1' c_2' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (59)$$

$$\alpha' = -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{23}}{A_{33}}\right)$$

$$\beta' = \arcsin(A_{13}) \quad (60)$$

$$\gamma' = -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{12}}{A_{11}}\right)$$

X-Z-Y:

$$R'_{XZY} = \begin{pmatrix} c'_3 c'_2 & -s'_3 & c'_3 s'_2 & 0 \\ c'_1 c'_2 s'_3 + s'_1 s'_2 & c'_1 c'_3 & -c'_2 s'_1 + c'_1 s'_3 s'_2 & 0 \\ c'_2 s'_1 s'_3 - c'_1 s'_2 & c'_3 s'_1 & c'_1 c'_2 + s'_1 s'_3 s'_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (61)$$

$$\alpha' = \text{atan}\left(\frac{A_{32}}{A_{22}}\right)$$

$$\beta' = \text{atan}\left(\frac{A_{13}}{A_{11}}\right) \quad (62)$$

$$\gamma' = -\text{arcsin}(A_{12})$$

Y-Z-X:

$$R'_{YZX} = \begin{pmatrix} c'_3 c'_2 & -c'_1 c'_2 s'_3 + s'_1 s'_2 & c'_2 s'_1 s'_3 + c'_1 s'_2 & 0 \\ s'_3 & c'_1 c'_3 & -c'_3 s'_1 & 0 \\ -c'_3 s'_2 & c'_2 s'_1 + c'_1 s'_3 s'_2 & c'_1 c'_2 - s'_1 s'_3 s'_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (63)$$

$$\alpha' = -\text{atan}\left(\frac{A_{23}}{A_{22}}\right)$$

$$\beta' = -\text{atan}\left(\frac{A_{31}}{A_{11}}\right) \quad (64)$$

$$\gamma' = \text{arcsin}(A_{21})$$

Y-X-Z:

$$R'_{YXZ} = \begin{pmatrix} c'_3 c'_2 + s'_1 s'_2 s'_3 & -c'_2 s'_3 + c'_3 s'_1 s'_2 & c'_1 s'_2 & 0 \\ c'_1 s'_3 & c'_1 c'_3 & -s'_1 & 0 \\ c'_2 s'_1 s'_3 - c'_3 s'_2 & c'_3 c'_2 s'_1 + s'_3 s'_2 & c'_2 c'_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (65)$$

$$\alpha' = -\text{arcsin}(A_{23})$$

$$\beta' = \text{atan}\left(\frac{A_{13}}{A_{33}}\right)$$

$$\gamma' = \text{atan}\left(\frac{A_{21}}{A_{22}}\right) \quad (66)$$

Z-Y-X:

$$R'_{ZYX} = \begin{pmatrix} c_3 c_2 & -c_1 s_3 + c_3 s_2 s_1 & s_1 s_3 + c_1 c_3 s_2 & 0 \\ c_2 s_3 & c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3 & -c_3 s_1 + c_1 s_3 s_2 & 0 \\ -s_2 & c_2 s_1 & c_1 c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (67)$$

$$\alpha' = \text{atan} \left(\frac{A_{32}}{A_{33}} \right)$$

$$\beta' = -\text{arcsin}(A_{31}) \quad (68)$$

$$\gamma' = \text{atan} \left(\frac{A_{21}}{A_{11}} \right)$$

Pro 6 permutací natočení prostoru pomocí vnějších rotací a 6 permutací natočení prostoru pomocí vnitřních rotací, viz Tabulka 11 – Permutace vnitřních a vnějších rotací.

Vnější rotace	Vnitřní rotace
$R_{XYZ}(\alpha \beta \gamma)$	$R'_{XYZ}(\alpha' \beta' \gamma')$
$R_{XZY}(\alpha \gamma \beta)$	$R'_{XZY}(\alpha' \gamma' \beta')$
$R_{YXZ}(\beta \alpha \gamma)$	$R'_{YXZ}(\beta' \alpha' \gamma')$
$R_{YZX}(\beta \gamma \alpha)$	$R'_{YZX}(\beta' \gamma' \alpha')$
$R_{ZXY}(\gamma \alpha \beta)$	$R'_{ZXY}(\gamma' \alpha' \beta')$
$R_{ZYX}(\gamma \beta \alpha)$	$R'_{ZYX}(\gamma' \beta' \alpha')$

Tabulka 11 – Permutace vnitřních a vnějších rotací

Za předpokladu, že výsledná rotační matice R'_C , která byla získána pomocí vnitřních rotací, musí být totožná s výslednou rotační maticí R_C , která byla získána pomocí vnějších rotací, lze z matice R_C vyjádřit jak vzorce pro úhly α' , β' , γ' , tak i vzorce pro úhly α, β, γ . Jako důkaz bude použit již dříve uvedený příklad vnější rotace X-Y-Z ($\alpha=30^\circ$ kolem osy X, $\beta=45^\circ$ kolem osy Y a $\gamma=60^\circ$ kolem osy Z), kdy výsledná rotační matice R_{XYZ} vypadá takto: (24) (23)

$$R_{XYZ} = \begin{pmatrix} \cos 60^\circ & -\sin 60^\circ & 0 & 0 \\ \sin 60^\circ & \cos 60^\circ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos 45^\circ & 0 & \sin 45^\circ & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin 45^\circ & 0 & \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 30^\circ & -\sin 30^\circ & 0 \\ 0 & \sin 30^\circ & \cos 30^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (69)$$

$$R_{XYZ} = \begin{pmatrix} 0,3536 & -0,5732 & 0,7392 & 0 \\ 0,6124 & 0,7392 & 0,2803 & 0 \\ -0,7071 & 0,3536 & 0,6124 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (70)$$

$$\alpha' = -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{23}}{A_{33}}\right) = -\operatorname{atan}\left(\frac{0,2803}{0,6124}\right) \cong -24,5939^\circ$$

$$\beta' = \operatorname{arcsin}(A_{13}) = \operatorname{arcsin}(0,7392) \cong 47,6633^\circ \quad (71)$$

$$\gamma' = -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{12}}{A_{11}}\right) = -\operatorname{atan}\left(\frac{-0,5732}{0,3536}\right) \cong 58,3301^\circ.$$

Výsledná rotační matice R'_C pro vnitřní rotace, která je také sestavená permutací X-Y-Z, ($\alpha=-24,5939^\circ$ kolem osy X, $\beta=47,6633^\circ$ kolem osy Y a $\gamma=58,3301^\circ$ kolem osy Z), vypadá takto:

$$R'_{XYZ} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos -24,5939^\circ & -\sin -24,5939^\circ & 0 \\ 0 & \sin -24,5939^\circ & \cos -24,5939^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos 47,6633^\circ & 0 & \sin 47,6633^\circ & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin 47,6633^\circ & 0 & \cos 47,6633^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos 58,3301^\circ & -\sin 58,3301^\circ & 0 & 0 \\ \sin 58,3301^\circ & \cos 58,3301^\circ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (72)$$

$$R'_{XYZ} = \begin{pmatrix} 0,3536 & -0,5732 & 0,7392 & 0 \\ 0,6124 & 0,7392 & 0,2803 & 0 \\ -0,7071 & 0,3536 & 0,6124 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (73)$$

Tedy:

$$R'_{XYZ}(-24,5939; 47,6633; 58,3301) = R_{XYZ}(30;45;60) \quad (74)$$

Za tohoto předpokladu musí i vzorce pro výpočet α' , β' , γ' , a α, β, γ být vyjádřeny z výsledné rotační matice jako jejich opačná permutace pro danou posloupnost natočení:

<p>X-Y-Z: $R'_C:$</p> $X(\alpha') = -atan\left(\frac{A_{23}}{A_{33}}\right)$ $Y(\beta') = arcsin(A_{13})$ $Z(\gamma') = -atan\left(\frac{A_{12}}{A_{11}}\right)$	<p>$R_C:$</p> $X(\alpha) = atan\left(\frac{A_{32}}{A_{33}}\right)$ $Y(\beta) = -arcsin(A_{31})$ $Z(\gamma) = atan\left(\frac{A_{21}}{A_{11}}\right)$
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>X-Z-Y: $R'_C:$</p> $X(\alpha') = atan\left(\frac{A_{32}}{A_{22}}\right)$ $Y(\beta') = atan\left(\frac{A_{13}}{A_{11}}\right)$ $Z(\gamma') = -arcsin(A_{12})$	<p>$R_C:$</p> $X(\alpha) = -atan\left(\frac{A_{23}}{A_{22}}\right)$ $Y(\beta) = -atan\left(\frac{A_{31}}{A_{11}}\right)$ $Z(\gamma) = arcsin(A_{21})$
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Y-Z-X: $R'_C:$</p> $X(\alpha') = -atan\left(\frac{A_{23}}{A_{22}}\right)$ $Y(\beta') = -atan\left(\frac{A_{31}}{A_{11}}\right)$ $Z(\gamma') = arcsin(A_{21})$	<p>$R_C:$</p> $X(\alpha) = atan\left(\frac{A_{32}}{A_{22}}\right)$ $Y(\beta) = atan\left(\frac{A_{13}}{A_{11}}\right)$ $Z(\gamma) = -arcsin(A_{12})$
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Y-X-Z: } R'_C: & & R_C: \\
 X(\alpha') &= -\arcsin(A_{23}) & X(\alpha) &= \arcsin(A_{32}) \\
 Y(\beta') &= \operatorname{atan}\left(\frac{A_{13}}{A_{33}}\right) & Y(\beta) &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{31}}{A_{33}}\right) \\
 Z(\gamma') &= \operatorname{atan}\left(\frac{A_{21}}{A_{22}}\right) & Z(\gamma) &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{12}}{A_{22}}\right)
 \end{aligned} \tag{78}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Z-Y-X: } R'_C: & & R_C: \\
 X(\alpha') &= \operatorname{atan}\left(\frac{A_{32}}{A_{33}}\right) & X(\alpha) &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{23}}{A_{33}}\right) \\
 Y(\beta') &= -\arcsin(A_{31}) & Y(\beta) &= \arcsin(A_{13}) \\
 Z(\gamma') &= \operatorname{atan}\left(\frac{A_{21}}{A_{11}}\right) & Z(\gamma) &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{12}}{A_{11}}\right)
 \end{aligned} \tag{79}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Z-X-Y: } R'_C: & & R_C: \\
 X(\alpha') &= \arcsin(A_{32}) & X(\alpha) &= -\arcsin(A_{23}) \\
 Y(\beta') &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{31}}{A_{33}}\right) & Y(\beta) &= \operatorname{atan}\left(\frac{A_{13}}{A_{33}}\right) \\
 Z(\gamma') &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{12}}{A_{22}}\right) & Z(\gamma) &= \operatorname{atan}\left(\frac{A_{21}}{A_{22}}\right)
 \end{aligned} \tag{80}$$

Na základě znalosti vztahů (75) - (80), by bylo možné vytvořit obecný cyklus pro rotační transformace prostoru a tyto vzorce tzv. "natvrdo" vypsát pro jednotlivé permutace pořadí os a to jak pro vnitřní, tak i vnější rotace. Avšak při pohledu na jednotlivé vzorce se nabízí mnohem elegantnější řešení, kdy mezi jednotlivými vztahy jsou již na první pohled patrné určité symetrie:

- při změně vnitřní a vnější rotace, kde se vyskytuje funkce *arkussinus*, dochází vždy ke změně znaménka a zároveň k opačné změně indexu prvku v matici (např. pro permutaci Z-X-Y)

$$X(\alpha') = +\arcsin(A_{32}) \Rightarrow X(\alpha) = -\arcsin(A_{23}) \tag{81}$$

- při změně vnitřní a vnější rotace, kde se vyskytuje funkce *arkustangens*, taktéž dochází ke změně znaménka, a k opačné změně indexu prvku matice dochází pouze v čitateli

$$\begin{aligned} Y(\beta') &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{31}}{A_{33}}\right) \Rightarrow Y(\beta) = +\operatorname{atan}\left(\frac{A_{13}}{A_{33}}\right) \\ Z(\gamma') &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{12}}{A_{22}}\right) \Rightarrow Z(\gamma) = +\operatorname{atan}\left(\frac{A_{21}}{A_{22}}\right) \end{aligned} \quad (82)$$

- pro danou vnitřní nebo vnější rotaci je vždy u funkce *arkussinus* opačné znaménko, než u obou zbylých funkcí *arkustangens*.

$$\begin{aligned} X(\alpha') &= +\operatorname{arcsin}(A_{32}) & X(\alpha) &= -\operatorname{arcsin}(A_{23}) \\ Y(\beta') &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{31}}{A_{33}}\right) & Y(\beta) &= +\operatorname{atan}\left(\frac{A_{13}}{A_{33}}\right) \\ Z(\gamma') &= -\operatorname{atan}\left(\frac{A_{12}}{A_{22}}\right) & Z(\gamma) &= +\operatorname{atan}\left(\frac{A_{21}}{A_{22}}\right) \end{aligned} \quad (83)$$

Pokud se jednotlivé osy rotace X, Y, Z označí svým číselným pořadovým indexem 1, 2, 3 (kdy X=1, Y=2 a Z=3), tak lze v příslušné matici odhalit další prvky symetrie. Např. pro danou permutaci rotace Z-X-Y platí, že vždy prostřední prvek (zde X, tedy úhel α), lze v celkové matici vyjádřit pouze pomocí funkce *arkussinus*:

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 \\ Z & X & Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_3 c_2 + s_1 s_2 s_3 & -c_2 s_3 + c_3 s_1 s_2 & c_1 s_2 & 0 \\ c_1 s_3 & c_1 c_3 & -s_1 & 0 \\ c_2 s_1 s_3 - c_3 s_2 & c_3 c_2 s_1 + s_3 s_2 & c_2 c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (84)$$

Znaménko u funkce *arkussinus* lze určit pomocí determinantu binární matice, která se sestaví pro dané permutace natočení. Pro obecnou matici $n \times n$, je determinant určen Leibnizovou rovnicí : (24)

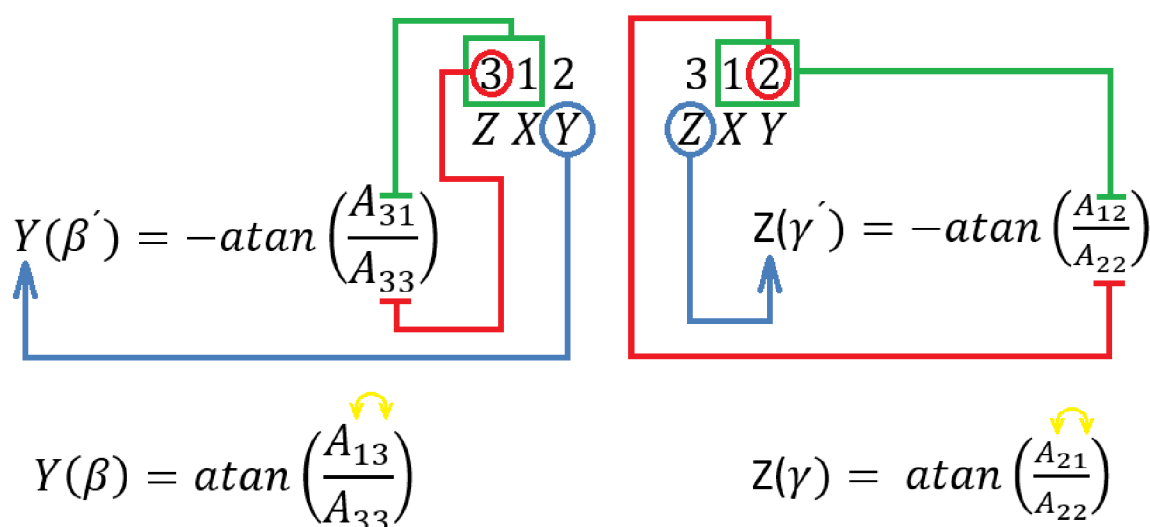
$$\det A = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) \prod_{i=1}^n A_{i,\sigma(i)}, \quad (85)$$

kde součet počítá všechny permutace čísel $\sigma \{1, \dots, n\}$ a $\operatorname{sgn}(\sigma)$ značí funkci pro znaménko permutace. Pokud je $\sigma > 0$, jedná se o sudou permutaci, pokud je naopak $\sigma < 0$, jedná se o lichou permutaci. V tomto textu se jedná převážně o matice 3×3 , kde lze determinant určit pomocí Sarrusova pravidla, viz rovnice (86). Jestliže se pro danou permutaci uvažuje s vnitřní rotací, tak je-li determinant záporný, je záporná i funkce *arkussinus*, jestliže je kladný, tak je kladná i funkce *arkussinus*. U vnějších rotací se znaménko obrací, tedy pokud je determinant kladný, je funkce *arkussinus* záporná, viz rovnice (87):

$$\det R_{ZXY} = \left| \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \right| = 1 \quad (86)$$

$$X(\alpha') = +\arcsin(A_{32}), X(\alpha) = -\arcsin(A_{23}). \quad (87)$$

Pro zbylé dva úhly se funkce *arkustangens* vyjadřují tak, že se ve jmenovateli provede zdvojení příslušného pořadového indexu nad opačným indexem rotace a v čitateli se použijí pořadové indexy nad opačnou a prostřední osou rotace. Přičemž platí, že se pro vnější rotace indexy řadí k prvku matice zprava doleva a u vnitřních se řadí zleva doprava, viz Obr. 34 – Způsob složení vzorců.



Obr. 34 – Způsob složení vzorců

Na základě znalosti tohoto způsobu složení vzorců, lze napsat smysluplný cyklus pro přepočet rotačních transformací, kdy z jedné rotační matice lze vyjádřit jakoukoliv jinou permutaci pořadí os, jedno jestli vnější či vnitřní.

Složená transformace prostoru

Při složené transformaci prostoru z rotace a posunutí, vypadá výsledná transformační matice T_c takto: (17) (26)

$$T_c = R_c \cdot P_c \quad (88)$$

Příklad pro vnitřní rotaci Z-Y-X:

$$T_c = \begin{pmatrix} c_3 c_2 & -c_1 s_3 + c_3 s_2 s_1 & s_1 s_3 + c_1 c_3 s_2 & 0 \\ c_2 s_3 & c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3 & -c_3 s_1 + c_1 s_3 s_2 & 0 \\ -s_2 & c_2 s_1 & c_1 c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & 0 & V_Y \\ 0 & 0 & 1 & V_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (89)$$

4.6.4 Popis cyklu pro přepočítání transformací

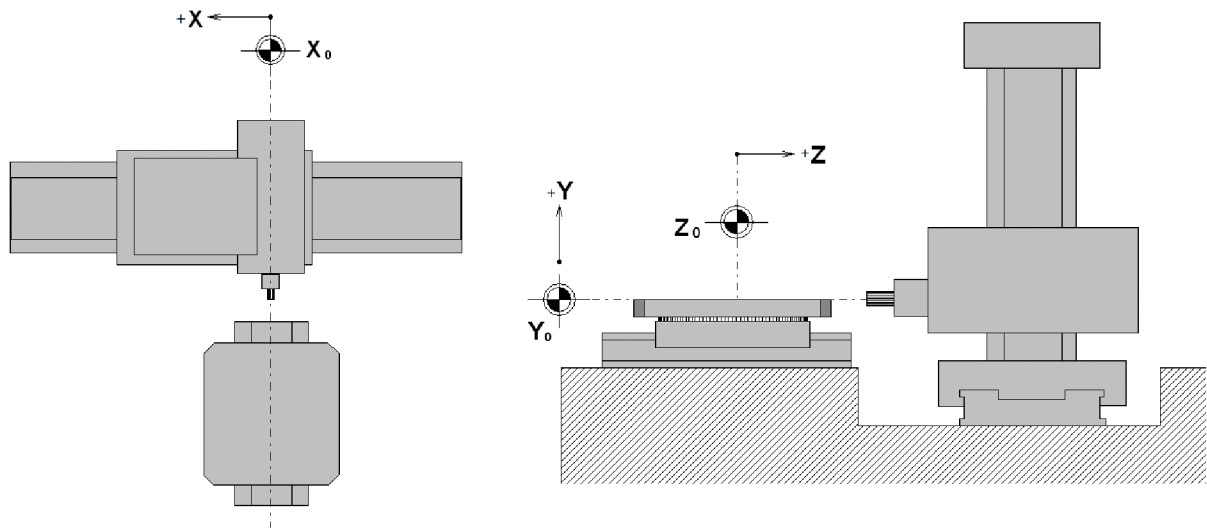
Pro použití standardního transformačního Sinumerik cyklu CYCLE800 je limitující počet rotačních os kinematického řetězce, který zvládá jednu nebo maximálně dvě osy. Tento tedy nelze použít pro standardní konfiguraci, kdy je stroj osazen otočným, případně naklápěcím stolem a zároveň úhlovou frézovací hlavou s dvěma osami rotace. Z toho důvodu bylo třeba vyvinout nový cyklus, pomocí kterého proběhne požadovaná transformace v souřadném systému a fyzické natočení k tomu potřebných os. Na základě výše popsání vztahů a odvozených vzorců, byl vytvořen cyklus CYCLE600 pro přepočítání vnitřních a vnějších rotací.

CYCLE600 (_C8_OR_ROT, _HLAVA, _BIN_KOM_10, _POS_X, _POS_Y, _POS_Z, ANG_X1, ANG_Y1, ANG_Z1, _POS_X_NAT, _POS_Y_NAT, _POS_Z_NAT, _ROT_INV, W_X_C8, W_Y_C8, W_Z_C8, _ROT_NEW)

<i>_C8_OR_ROT</i>	Bool	Volba vnitřní / vnější rotace
<i>_Hlava</i>	String	Použité technologické zařízení
<i>_Bin_kom_10</i>	Integer	Binární kombinace natočení souřadného systému
<i>_Pos_X</i>	Real	Referenční bod před rotací
<i>_Pos_Y</i>	Real	Referenční bod před rotací
<i>_Pos_Z</i>	Real	Referenční bod před rotací
<i>_Ang_X1</i>	Real	Úhel vnější rotace kolem první osy
<i>_Ang_Y1</i>	Real	Úhel vnější rotace kolem druhé osy
<i>_Ang_Z1</i>	Real	Úhel vnější rotace kolem třetí osy
<i>_Pos_X_nat</i>	Real	Posunutí první osy po rotaci
<i>_Pos_Y_nat</i>	Real	Posunutí druhé osy po rotaci
<i>_Pos_Z_nat</i>	Real	Posunutí třetí osy po rotaci
<i>_Rot_inv</i>	Bool	Inverzní natočení technologického zařízení
<i>W_X_C8</i>	Real	Úhel vnitřní rotace kolem první osy
<i>W_Y_C8</i>	Real	Úhel vnitřní rotace kolem druhé osy
<i>W_Z_C8</i>	Real	Úhel vnitřní rotace kolem třetí osy
<i>_Rot_new</i>	Bool	Volba nové / aditivní rotace

Tabulka 12 – Přehled parametrů CYCLE600

Základním předpokladem pro funkčnost CYCLE600 je, aby nulový bod stroje byl totožný se středem otočného stolu, jenž je v nulové poloze, tzn. strojní osa X je rovna středu stolu, strojní osa Y je totožná s hranou upínací otočné desky stolu, strojní osa Z je rovna ose rotace stolu, viz Obr. 35 – Nulové body os Xm, Ym a Zm. Pochopitelně je takto pojednáno v čistě teoretické rovině, neboť u těžkých a rozměrných obráběcích strojů dochází k určitým geometrickým odchylkám s časem a teplotou okolí, nevyjímaje vlivy průhybu upnutého obrobku či otočného stolu po natočení. V praktické rovině je nutností nulový bod kontrolovat, případně doměřovat během obrábění, určitým způsobem mohou být nasazeny i různé kompenzace (teplotní, geometrické, polohové).



Obr. 35 – Nulové body os X_m , Y_m a Z_m

Výše popsáný CYCLE600 je uveden v příloze této disertační práce, z důvodu udržení know-how jsou však vyňaty některé pasáže, případně nahrazeny. Jedná se zejména o pasáže, kde je řešeno fyzické natočení os stolu. Dokončený cyklus byl otestován na reálném, prostorově a finančně náročném pracovišti se závěrem – jedná se o funkční cyklus. Je však možné, ba dokonce pravděpodobné, že při jeho rozsáhlém nasazení bude třeba dalšího vývoje, rozšíření a úprav.

5. METODIKA MĚŘENÍ

Na základě shora sepsaných informací, poznatků a zjištění je pro dosažení co nejlepších a nejpřesnějších výsledků potřeba dodržovat obecně platné principy měření, které je možno shrnout v následující metodické pokyny:

- 1) Provádět pravidelnou kalibraci měřicí sondy
- 2) Nejdříve kalibrovat rádius, posléze kalibrovat délku měřicího doteku (sondy)
- 3) Kalibrační získaná data nejsou přenositelná na jiné technologické zařízení, případně mezi vřetenem stroje a vřeteny jednotlivých technologických zařízení
- 4) Kalibrační získaná data nejsou použitelná pro jiná natočení souřadného systému (CYCLE800, TRAORI), než-li natočení / rovina při původní kalibraci
- 5) Sondu kalibrovat po každé výměně / manipulaci s měřícím dotekem
- 6) Sondu kalibrovat po každé výměně nástrojů, resp. jejím opětovném založení
- 7) V případě teplotních dilatací obráběcího stroje, které vznikají zejména s jeho postupným nebo skokovým prohříváním v závislosti na pracovních otáčkách vřetena a času (nejčastěji u vřeten uložených mimo osu hlavního pohonu), či při změnách teplot okolního prostředí mimo přípustné tolerance dané výrobcem stroje, je nutné provést novou kalibraci měřicí sondy
- 8) Při měření používat / programovat vždy stejný posuv jako při kalibraci, zcela vyloučeno je použití rychloposuvu, ve výsledné pracovní rovině lze doporučit rychlost jednotlivých os = 300 mm/min
- 9) Pro dané měření vždy zvolit správný typ kalibrace měřicí sondy, tj. multi nebo mono (k dosažení nejpřesnějších výsledků lze doporučit pouze mono), a tímto typem zároveň provádět i následná měření
- 10) Volba vhodného tvaru měřicího doteku dle typu aplikace a dodavatelských nabídek / doporučení (na měření průměrů, délek, drážek, za roh ... a různých kombinací)
- 11) Volba vhodné délky měřicího doteku – u příliš krátkého doteku nemusí dojít ke kontaktu s obrobkem v místě předpokládaného měření, a tím pádem hrozí kolize stroje nebo sondy. Naopak příliš dlouhý, nebo složený dotek z více kusů ovlivňuje přesnost měření
- 12) Volba vhodného průměru kuličky doteku – příliš malý průměr může způsobit sepnutí sondy vlivem kolize dřívku doteku s měřeným obrobkem. Případně může při měření hrubších povrchů zkreslovat informace měřením v jeho nerovnostech
- 13) Volba vhodného materiálu kuličky doteku

Pro popsání metodiky měření obecných prostorových ploch byla vybrána zde již dříve zmiňovaná lopatka větrné turbíny, která se upíná do účelově speciálně zkonstruovaného a vyrobeného upínacího zařízení. S ohledem na zhotovení takových lopatek metodou ručního laminování, nelze v sériové výrobě zaručit tvarovou a rozměrovou stálost všech ploch v řádech setin milimetrů, a to ani za použití objemných laminovacích forem. Opakovatelnost upnutí, a z toho vyplývajících poloh obrobků vůči obráběcímu stroji jsou v podstatě i při jinak drobných

odchylných velkým problémem, neboť při známých délkách obrobků vznikají na protilehlých koncích rozdíly v rádech několikaset milimetrů. Dále při použití nutného polohování obráběné lopatky pomocí upínacího zařízení nemusí být zaručeno dosažení přesné polohy, jelikož je použit řetězový mechanismus a aretace polohy pomocí čepu. Za takto definovaných vstupních podmínek je třeba každou polohu lopatky zaměřit obráběcím strojem pomocí obrobkové měřicí sondy a použitím výše popsaných transformačních cyklů s výpočtem naklopení kolem jednotlivých strojních os a určením polohu středu. Vzhledem k tomu, že každá chyba měření v řádu setin milimetru či setin úhlového stupně se projevuje na celé délce lopatky (např. v až 80 metrech délky), je nutno dbát i na stav samotného stroje (provádět pravidelné servisní prohlídky, kontrolovat geometrickou přesnost a přesnost polohování jednotlivých os), tak také provádět pravidelné školení údržby takového stroje a vybírat svědomitou a pečlivou obsluhu. Při proceduře měření je vhodné předem definovat a následně zařadit několik kontrolních milníků, které by v případě nejakosti nebo špatně získaných dat dokázaly včas zastavit celý proces a zabránit fatálním škodám vedoucím k vyzmetkování a následnému sešrotování obrobku (celkové částky dosahují desítky až statisíce EUR, dle typu lopatky a výrobních nákladů). Vzhledem k tomu, že do celého procesu vstupuje kromě strojů stále ještě i lidský faktor (bez něhož se nelze obejít), je doporučeno u stěžejních milníků používat i “Kontrolu čtyř očí”.

Nutným předpokladem z předchozích výrobních etap je mít zaručeno, že příruba lopatky je v době dodání ke stroji kolmá k její podélné ose a že jsou navrtány osy dvou kolíkovacích míst pro čepování lopatky k přírubě generátoru větrné turbíny (tato kontrolní místa zaručují správnou orientaci lopatky k náboji rotoru generátoru, a tím celkové vyvážení soustavy). Dále musí být lopatka v upínacím zařízení řádně založena a zajištěna proti pootočení.

Navržená metodika měření:

- Nabrat správnou úhlovou frézovací hlavu, založit obrobkovou měřicí sondu a provést kalibraci v základním natočení (pomocí cyklu PROBE_CALIB)
- Napolohovat zkalibrovanou sondu do bezpečné vzdálenosti před čelo příruby
- Z této pozice spustit cyklus měření, viz Obr. 7 – Měření hrany v jednom bodě, čímž se ověří správnost založení obrobku v upínacím zařízení vůči základnímu nenatočenému prostoru obráběcího stroje
- Provést měření bodů A1, A2, B1 a B2, viz. Obr. 29 – Obrábění příruby lopatky větrné turbíny. Z bodů A1, A2 a B1, B2 vyjádřit pomocí Pythagorovy věty vnější úhly α a β , tedy natočení kolem strojních os X_m a Y_m
- Pomocí cyklu CYCLE600 provést pro zvolenou permutaci natočení přepočítání na vnitřní úhly α' a β' a poté provést transformaci technologického příslušenství
- V dané transformační rovině provést novou kalibraci obrobkové sondy, a poté v této rovině zopakovat měření bodů A1, A2, B1 a B2. Výsledné natočení by mělo být teoreticky 0° , případně ležet v předem definované maximální hodnotě tolerance (použito jako jeden z milníků)
- Z výkresové dokumentace jsou známy pozice kontrolních míst pro čepy, napolohovat se sondou do bezpečné vzdálenosti před pozici prvního čepu, poté v měřicím režimu MEAS napolohovat na hloubku měření (v systému SIN 840D režim, kdy během polohování se sondou je hlídáno její sepnutí – vyhodnoceno jako kolize) a provést

z měření středu pomocí cyklu, viz. Obr. 9 – Měření otvoru, hřídele, drážky. Po vyhodnocení návrat do bezpečné pracovní hladiny

- Napolohovat sondu na pozici středu otvoru pro druhý kontrolní čep (opět v režimu MEAS hlídat možnost kolize), provést stejné měření jako v předchozím bodě i pro druhé místo a vyhodnotit pozici středu
- Porovnáním naměřených a výkresových pozic obou kontrolních míst lze vyjádřit vnější úhel γ , tedy natočení okolo osy Z_m
- Pomocí úsečky vedené těmito body lze zjistit její střed a porovnáním tohoto středu vůči výkresové poloze středu lopatky lze vyjádřit jeho polohu
- Pomocí cyklu CYCLE600 provést pro zvolenou permutaci natočení přepočtení vnějších úhlů α , β , γ na vnitřní úhly α' , β' a γ' , a poté provést transformaci technologického příslušenství
- V této transformační rovině provést novou kalibraci obrobkové sondy
- Provést kontrolní měření celé příruby a vyhodnotit naměřené odchylky vůči předem definované maximální chybě (bráno jako poslední milník před spuštěním vlastního obrábění)

Celou metodiku měření je s ohledem na lidský faktor možno zautomatizovat do jednoho cyklu, a tím ho co nejvíce eliminovat. Oproti standardní metodě zaměření takového obrobku pomocí laser trackeru, lze automatizovaným měřícím cyklem výrazně zkrátit vedlejší čas. Procedura měření pomocí laser trackeru (bráno od založení lopatky po vygenerování programu) trvá minimálně tři hodiny, kdežto pomocí automatizovaného cyklu trvá 30 minut.

Výhodou používání cyklu CYCLE600 v těchto případech je možnost jej použít parametricky, kdy se přepočte první natočení příruby v osách X_m , Y_m a Z_m a poté jej lze programovat jako aditivní rotace k již aktuální rovině (lze tedy použít natočení z výrobního výkresu), kdy se nemusí generovat pro každou další lopatku nový program.

6. ZÁVĚR

Cílem této disertační práce bylo navrhnout metodiku měření obecných prostorových ploch. Hlubším studiem této problematiky došlo k rozdělení problému na několik samostatných dílčích problémů a hledání jejich řešení. Zprvu bylo třeba porovnat jednotlivé výrobce obrobkových měřících sond a zjistit zda nedochází k rozdílům v použití sond nebo v naměřených výsledcích. Poté byla provedena kontrola standardně dodávaných měřících cyklů a prověřena kalibrace sond. V textu práce je popsán příklad, kdy se nelze spoléhat na standardně dodávané měřící cykly s tím, že jsou univerzální. Tím příkladem je obyčejné zaměření středu válce, zároveň byl navržen způsob řešení. Byly popsány nedostatky při (ne)používání pravidelné kalibrace sond a vytvořen seznam nejčastějších chyb při jejich používání. Dalším dílčím problémem byla kontrola kompenzačních dat technologických zařízení. Nejobsáhlejší bylo studium problematiky transformací a jejich vztahů. V závěru byla navržena metodika měření lopatky větrné turbíny.

6.1. Přínosy pro vědecké poznání

Přínos této práce pro vědecké poznání spočívá v matematickém popisu jednotlivých transformací v kartézském souřadném systému. Jedná se zejména o prohloubení znalostí a vztahů mezi vnitřními a vnějšími rotacemi, určení vzájemných vazeb mezi nimi a to i pro jejich různé permutace natáčení. Ověření správnosti získaných výsledků a kontrola dílčích výpočtů byla prováděna v programu Matlab v balíčku Robotics System Toolbox. Tento dovoluje uživateli jen permutace rotací, které jsou v technické praxi nejvíce používané. Nezávisle na tomto balíčku byly vytvořeny vlastní knihovny, které umožňují použití libovolných permutací. Vlastní implementace v programovacím jazyce C++ a Matlab kombinuje elementy lineární algebry a kombinatoriky a představuje značný vědecký přínos této práce. Knihovny v Matlabu jsou volně ke stažení pod odkazem:

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/133287-evaluation-of-intrinsic-rotations>

6.2. Přínosy pro praxi

Přínosů pro technickou praxi je více, patří mezi ně zmapování měřících procesů na těžkých obráběcích strojích, objasnění problému kalibrace obrobkových sond včetně návrhu vlastního řešení. Toto řešení spočívá v návržení kalibračního stojánu a vytvoření univerzálního kalibračního cyklu a navazujících podcyklů. Dalším přínosem je objasnění problému při měření se sondou na strojích, které jsou vybaveny technologickým zařízením a vlastní návrh kontroly kompenzačních dat pro různé frézovací a vyvrtávací hlavy. Za tímto účelem byl vytvořen cyklus HEAD_CALIB pro provádění jejich pravidelné aktualizace. Hlavním přínosem této práce je vytvoření, ověření a úspěšné odzkoušení cyklu CYCLE600, kterým lze přepočítat různé druhy transformací, a to jak translačních, tak i rotačních, v souřadném systému stroje. Doposud jsou z praxe známy pouze příklady, kdy je možno pro dané pořadí rotace kolem os určit pouze výsledné natočení souřadného systému a částí stroje. Není ale znám příklad použití

univerzálního cyklu, který by uměl převádět jednotlivé druhy rotací mezi sebou nebo mezi vnitřními a vnějšími rotacemi anebo jejich přepočty pro různé permutace pořadí natočení.

6.3. Návrh dalšího výzkumu

Z hlediska vědeckého poznání by další výzkum mohl spočívat v hlubším prozkoumání vazeb mezi rotacemi. Teoreticky by se ve výsledné transformační matici měly skrývat i ostatní rotace, např. pomocí Eulerových úhlů. Jiný směr výzkumu by mohl spočívat v popisu rotací pomocí kvaternionů. Časová náročnost hledání těchto vazeb však překračuje rozsah této práce.

Z hlediska technické praxe by další výzkum mohl v případě komerčního zájmu o všechny zde popsané cykly spočívat v jejich dalším vývoji a využití. Velmi zajímavé by mohlo být např. vytvoření uživatelsky přívětivého prostředí s přehlednou grafickou podporou nebo také vytvoření variant cyklů pro nové verze řídicího systému, kterým bude v brzké době uvedení SINUMERIK ONE. Také by mohlo být zajímavé vytvořit stejné cykly i pro ostatní ŘS, jako je např. Heidenhain nebo Fanuc.

Vzhledem k tomu, že autor této disertační práce je zároveň i tvůrcem a držitelem autorských práv na všechny zde popsané cykly, není možno jakýkoliv text bez jeho souhlasu použít či dále publikovat.

CITOVANÁ LITERATURA

1. **Marek, Tomáš a Marek, Jiří.** *Mít sondu nestačí.* Brno : Renishaw s.r.o., 2017. ISBN: 978-80-87017-20-3.
2. **Renishaw.** Renishaw.cz. *Snímací systémy pro CNC obráběcí stroje.* [Online] Renishaw, 2014. [https://resources.renishaw.com/cs/download/\(652050b1403b4ea2927d69c8.H-2000-3628-10-A](https://resources.renishaw.com/cs/download/(652050b1403b4ea2927d69c8.H-2000-3628-10-A).
3. **Heidenhain.** Heidenhain s.r.o. www.heidenhain.cz. [Online] červen 2019. https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/1113984-C2_Dotykov%C3%A9_sondy_cs.pdf.
4. **Renishaw.** Renishaw.cz. www.renishaw.cz. [Online] Renishaw, 11 2016. <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/68c420189e65469c839a5bfe20f3d3ff.pdf>.
5. —. Renishaw.cz. www.renishaw.cz. [Online] Renishaw, 06 2018. <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/ca1d185b96ba432195db34691c2c88ed.pdf>.
6. **Siemens.** Sinumerik. *SINUMERIK 840D sl / 828D Měřící cykly.* Nürnberg : Siemens AG, 2013. Sv. 6FC5398-4BP40-3UA1.
7. **s.r.o., Heidenhain.** Popisný dialog Heidenhain iTNC530. *Příručka uživatele.* [Online] Heidenhain s.r.o., 2013. [Citace: 28. Říjen 2020.] www.heidenhain.cz.
8. **Corporation, Fanuc.** *FANUC Series 30i/31i/32i-A - Reverse motion function for restart.* místo neznámé : Fanuc Corporation, 2011. B-64483EN-1/02.
9. **Blum-Novotest.** *TC52 Dotyková sonda.* [Online] Blum-Novotest s.r.o., 2013. <https://www.blum-novotest.com/cz/vyrobky/merici-komponenty/sondy/tc52-tc62.pdf>. [cit. 2019-02-18].
10. **Hexagon.** <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/>. *m&h Měřící dotykové sondy s infračerveným.* [Online] Hexagon AB, 2017. <https://docplayer.org/13580867-Produktbroschuere-m-h-messtastersysteme-mit-infrarotuebertragung-messen-in-der-werkzeugmaschine-flexibel-zukunftssicher.html>.
11. **Ohnistova P., Pista M., Prat D.** Polynomial Interpolation in 5-Axis Milling. *MM Science.* [Online] MM Science Journal, 2018. [Citace: 22. 03 2022.] <https://www.mmscience.eu/journal/issues/november-2018/articles/polynomial-interpolation-in-5-axis-milling>. DOI : 10.17973/MMSJ.2018_11_201816.
12. **Kupřin N., Sveda J., Chladek S., Havlan T., Novotny L., KOubek J.** MM Science. *MM science Journal.* [Online] 10 2022. [Citace: 14. 8 2023.] <https://www.mmscience.eu/journal/issues/october-2022/articles/new-device-for-rapid-measurement-of-machine-tool-geometric-errors>. DOI: 10.17973/MMSJ.2022_10_2022120.
13. **Holub M., Blecha P., Bardac F., Kana R.** MM Science. *MM Science Journal.* [Online] 10 2015. [Citace: 20. 11 2022.] <https://www.mmscience.eu/journal/issues/october-2015/articles/volumetric-compensation-of-three-axis-vertical-machining-centre>. DOI : 10.17973/MMSJ.2015_10_201534.
14. **Siemens AG.** *Sinumerik 840 sl/ 840DE sl/ 828D Základy, Programovací příručka.* Nürnberg : Siemens AG, 2010. 6FC5398-1BP20-1UA0.

15. **E-matematika.** E-matematika. *www.e-matematika.cz*. [Online] [Citace: 15. 9 2023.] <https://www.e-matematika.cz/stredni-skoly/jak-urcit-stredovou-rovnici-kruznice-prochazejici-tremi-body.php>.
16. **wikipedia.org.** Sférická soustava souřadnic. *cs.wikipedia.org*. [Online] Wikipedia. [Citace: 15. červen 2021.] https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sf%C3%A9rick%C3%A1_soustava_sou%C5%99adnic&oldid=17279740.
17. **Jindřich, Bečvář.** *Lineární algebra*. Praha : Matfyzpress, 2005. ISBN 80-86732-57-6.
18. **Miloslav, Štulpa.** *CNC Programování obráběcích strojů*. Praha : Grada Publishing a.s., 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
19. **Ježek František, Míková Marta.** *Maticová algebra a analytická geometrie, 2, přeprac. vyd.* Plzeň : Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-966-6.
20. **Reichl, J.** Encyklopedie fyziky. *Tuhé těleso*. [Online] [Citace: 20. Září 2021.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1298-popis-rotace-tuheho-telesa-eulerovy-kinematicke-rovnice6>.
21. **Zuzana, Štauberová.** *Mongeovo promítání, 1. vyd.* Plzeň : Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-323-X.
22. **P.G., Ciarlet a J.L., Lions.** *Handbook of Numerical Analysis, Vol. 4, Finite Element Methods - Numerical Methods for Solids (Part 2)*. Elsevier : Elsevier Science, 1996. ISBN 9780444817945.
23. **Stephen, Thonton T. a Jerry, Marion B.** *Classical Dynamics of Particles and Systems, fifth edition*. Bethlehem, PA : Lehigh Press, 2004. ISBN 0-534-40896-6.
24. **Ken, Shoemake.** *Rotation with Quaternion Curves Proc.* San Francisco, CA : Sig-Graph, 1985. ACM 0-89791-166-0/85/007/0245.
25. **coauthors, Brannon M. Rebecca and.** *Rotation - A review of useful theorems involving proper orthogonal matrices referenced to threedimensional physical space*. Albuquerque : Sandia National Laboratories. NM 87185-0820.
26. **wikipedia.org.** Wikipedia. *Wikipedia.org*. [Online] [Citace: 15. 01 2024.] https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles#Tait%E2%80%93Bryan_angles.

SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

Seznam vlastních prací vztahujících se k tématu disertace:

1. Lehner, R., Obrobkové sondy a úskalí jejich použití, MM Průmyslové spektrum, Praha, 2019, č. 6, s. 64, rubrika Trendy / Obrábění, kód článku: 190659, ISSN: 1212-2572
2. Lehner, R., Valdman, J., Zídková, H., Methodology of rotations of general surfaces, MM Science Journal, 2024, prozatím v procesu schvalování

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA č. 1 Kalibrační cyklus pro obrobkovou sondu PROBE_CALIB	I
PŘÍLOHA č. 2 Kalibrační cyklus pro technologická zařízení HEAD_CALIB.....	XVI
PŘÍLOHA č. 3 Cyklus pro přepočítání transformací CYCLE600	XXVII
PŘÍLOHA č. 4 Cyklus pro měření neúplného kruhu IOV_SEGMENT	XXXIX

PŘÍLOHA č.1

Kalibrační cyklus pro obrobkovou sondu PROBE_CALIB

```
N10 PROC PROBE_CALIB (STRING[30] _HLAVA, INT _NO, REAL _UHEL, REAL _KDOVOLA, REAL _DIA, REAL _LEN,  
REAL _C800_MODE) SAVE DISPLOF  
;SPATH=/_N_CUS_DIR
```

```
-----  
;HCW 3-250Nc + IOV350 + TDV8, Ob25096 + Ob25141 + Ob25097, ALSTOM2, USA  
;ZAK. C.: 391-812-6565  
-----
```

```
-----  
;PROBE_CALIB  
-----
```

```
;SOURCE : A_20210416 LEH  
;VERSION: B_20211029 LEH - PRIDANA KALIBRACE POD 45°  
; - OPRAVA SIMULACE A BLOCK SEARCH  
; - OPRAVA _CAL_P, KOMUN  
; - PRIDANO HLIDANI DELKY SONDY  
; B_20211124 LEH - PRIDANO HLIDANI PRUMERU KULICKY  
; B_20220308 LEH - PRIDANO HLIDANI DATA A CASU KALIBRACE  
; - PRIDANA MOZNOST VYPISU POSLEDNI KALIBRACE  
; B_20220313 LEH - OPRAVA _CAL_P[x]  
; - PRIDANO _PROBE_LENHT_TOL, _PROBE_RADIUS_TOL  
; - PRIDANO _UHEL, ODJ_Z, _HL_Z, _XM_ACT_POS  
; - HLIDANI YM KOLEM PICKUPU  
; C_20220325 LEH - MOZNOST VLASTNIHO NATOCENI C800  
; - ZJEDNODUSENI PROGRAMU  
; C_20120515 LEH - PRIDAN SERVIS STOP  
; - VYTVOREN PROBE_DEF  
; - ZMENA HLASENI  
; - PRIDANO _RS1_L, _RS2_L, _POMO[10], _YM_ACT_POS  
; - DEFINICE BEZPECNOSTNICH ZON AZ KOLEM TRI NABIRACICH POZIC  
; - PRIDANO _X_SAFE_FEED_TRAVEL, _FINE_FEED, _RAPID_FEED  
; - OPRAVA VERZI HLASENI  
; - PREDANI ALSTOM  
; D_20220608 LEH - MOZNOST KALIBRACE PRUMERU NA OBROBKU  
; - PRIDANA KALIBRACE DELKY NA OBROBKU  
; - VYTVOREN PROBE_WORK  
; - PRIDANA MOZNOST PREPISU DAT WP[X,Y] PRI KALIBRACI V JOGU  
; - PRIDANA MOZNOST KALIBRACE VE SMERU YM /POZICE 3/  
; - OPRAVA PRNUM, ODLADENO PRO V:4.3.6  
; E_20221015 LEH - OPRAVA _KDOVOLA, PRIDANO _DIA, _LEN
```

```
-----  
;POPIS CYKLU A PROMENNYCH  
-----
```

```
;KALIBRACE SONDY MONO / MULTI VE VRETENI STROJE NEBO V TZ (DELKA & PRUMER)  
;VOLANI: - PROBE_CALIB("COVER",0,0,0) - KALIBRACE SONDY, BEZ TZ, MONO  
; PROBE_CALIB("IFVW207S_SK2",1,45,1) - KALIBRACE SONDY, IFVW207, POD 45°, MULTI  
; PROBE_CALIB() - VYPISE INFO O POSLEDNI PROVEDENE KALIBRACI  
; PROBE_CALIB("IFVW102S_SK2_EXT",4,0,11) - KALIBRACE SONDY NA PRUMER NA OBROBKU - MULTI  
;_HLAVA - COVER NEBO " "  
; IFVW102S_SK2  
; IFVW102S_SK2_EXT  
; IFVW102S_SK1  
; IFVW102S_SK1_EXT  
; IFVW207S_SK2
```

```
; IFVW206S_SK1
;_No - 0 - KALIBRACE V G17
; 1 - KALIBRACE V G19, SMER MINUS XM
; 2 - KALIBRACE V G19, SMER PLUS XM
; 3 - KALIBRACE V G19, SMER MINUS YM /V ALSTOMU CHYBI TATO MOZNOST/
; 4 - KALIBRACE NA OBROBKU
;_UHEL - UHEL NATOCENI KOLEM OSY Z PRI KALIBRACI
;_KDOVOLA - 0 - KALIBRACE MONO (DELKA A PRUMER)
; 1 - KALIBRACE MONO I MULTI (DELKA A PRUMER)
; 10 - KALIBRACE MONO S VLASTNIM NATOCENIM C800 (PRUMER POUZE)
; 11 - KALIBRACE MONO I MULTI S VLASTNIM NATOCENIM C800 (PRUMER POUZE)
; 100 - KALIBRACE MONO S VLASTNIM NATOCENIM C800 (DELKA POUZE)
; 101 - KALIBRACE MONO I MULTI S VLASTNIM NATOCENIM C800 (DELKA POUZE)
; 111 - KALIBRACE MULTI S VLASTNIM NATOCENIM C800 (DELKA POUZE)
; 1000 - KALIBRACE MONO (POUZE PRUMER)
; 1001 - KALIBRACE MONO I MULTI (POUZE PRUMER)
; 1100 - KALIBRACE MULTI (PRUMER POUZE)
; 1011 - KALIBRACE MULTI S VLASTNIM NATOCENIM C800 (PRUMER POUZE)
; 10000 - KALIBRACE MONO (DELKA POUZE)
; 10001 - KALIBRACE MONO I MULTI (DELKA POUZE)
; 10011 - KALIBRACE MULTI (DELKA POUZE)
;_WP[0,X] - KALIBRACE SONDY V JOGU - CISLO SONDY V _JM_[1]!!!
;_WP[1,X] KALIBRACE SONDY /TYP MONO/ V AUTOMATU - CISLO SONDY 102!!!
;_WP[2,X] KALIBRACE SONDY /TYP MULTI/ V AUTOMATU - CISLO SONDY 003!!!
;_CAL_P[0] - 0 - KALIBRACE MONO
; 1 - KALIBRACE MULTI I MONO
;_CAL_P[1] - 1 - CHYBA KALIBRACE
; 9 - DOKONCENA KALIBRACE
;_CAL_P[2] - KOD PRISLUSENSTVI
;_CAL_P[3] - AKTUALNI UHEL HITRH1
;_CAL_P[4] - AKTUALNI UHEL HIRTH2
;_CAL_P[5] - KALIBRACNI OTVOR
;_CAL_P[6] - UHEL PRI KALIBRACI
;_XM_ZONA_SAFE_KONEC - VYJEZD NA POZICI XM NA KONCI CYKLU
;_YM_ZONA_SAFE_KONEC - VYJEZD NA POZICI YM NA KONCI CYKLU
;_XM_ZONA_SAFE_PLUS - BEZPECNY PRACOVNI PROSTOR KOLEM KALIBRACNI KOSTKY V XM+
;_XM_ZONA_SAFE_MINUS - BEZPECNY PRACOVNI PROSTOR KOLEM KALIBRACNI KOSTKY V XM-
;_XM_ZONA_SAFE_C800 - POZICE XM, KDE LZE BEZPECNE TOCIT CYCLEM800
;_YM_ZONA_SAFE_C800 - POZICE YM, KDE LZE BEZPECNE TOCIT CYCLEM800
;_STYLUS_L - DELKA STYLUSU SONDY
;_PROBE_BODY_L - DELKA TELESY SONDY
;_PROBE_RADIUS - POLOMER KULICKY SONDY
;_RS1_L - DELKA REDUKCNI VLOZKY (RS) PRO VRETENO
;_RS2_L - DELKA REDUKCNI VLOZKY (RS) PRO HLAVU
;_PROBE_LENHT_TOL - TOLERANCE DELKY SONDY
;_PROBE_RADIUS_TOL - TOLERANCE RADIUSU SONDY
;_ODJ_Z - ODJEZDY V OSE Z
;_HL_Z - HLOUBKA NAJETI V OSE Z
;_CAL_POS_X_LENHT - POZICE X PRI KALIBROVANI DELKY
;_CAL_POS_Y_LENHT - POZICE Y PRI KALIBROVANI DELKY
;_CAL_POS_X_DIA - POZICE X PRI KALIBROVANI PRUMERU
;_CAL_POS_Y_DIA - POZICE Y PRI KALIBROVANI PRUMERU
;_X_SAFE_FEED_TRAVEL - RYCHLOST POSUVU KOLEM PICKUPU
;_PICK1_SAFE_POS_XM_PLUS - BEZPECNA POZICE VE SMERU XM PLUS OD PICKUPU
;_PICK1_SAFE_POS_XM_MINUS - BEZPECNA POZICE VE SMERU XM MINUS OD PICKUPU
```

```
;- PICK1_SAFE_POS_TRAVEL - BEZPECNA POZICE XM, KDE LZE JET YM+
;- PICK2_SAFE_POS_XM_PLUS - BEZPECNA POZICE VE SMERU XM PLUS OD PICKUP1
;- PICK2_SAFE_POS_XM_MINUS - BEZPECNA POZICE VE SMERU XM MINUS OD PICKUP1
;- PICK2_SAFE_POS_TRAVEL - BEZPECNA POZICE XM, KDE LZE JET YM+
;- PICK3_SAFE_POS_XM_PLUS - BEZPECNA POZICE VE SMERU XM PLUS OD PICKUP2
;- PICK3_SAFE_POS_XM_MINUS - BEZPECNA POZICE VE SMERU XM MINUS OD PICKUP2
;- PICK3_SAFE_POS_TRAVEL - BEZPECNA POZICE XM, KDE LZE JET YM+
;- OVERWRITE_JOG_PROBE_CAL - PREPIS WP[X,Y] I PRO JOG, /TRUE - PREPSAT, FALSE - NEPREPSAT/
;- JOG_PROBE_SMT_MONO - CISLO SONDY PRO JOG, MONO /101/
;- JOG_PROBE_SMT_MULTI - CISLO SONDY PRO JOG, MULTI /002/
;- AUT_PROBE_SMT_MONO - CISLO SONDY PRO AUT, MONO /102/
;- AUT_PROBE_SMT_MULTI - CISLO SONDY PRO AUT, MULTI /003/
;- SMT_PROBE_TYP_MONO - TYP SONDY POUZIT PRO JOG TRUE - MONO, FALSE - MULTI
;- HL_POHON_100KW - HLAVNI POHON 100KW=TRUE, 130KW=FALSE
;- PROBE_ACTIVE - POKUD BYLA PRED VOLANIM CYKLU SONDA AKTIVNI, ZUSTANE AKTIVNI I NA KONCI
;!!! VSE ZADAVAT V SOURADNEM SYSTEMU STROJE (G500) !!!
```

```
;------
```

```
;------
```

```
;DEFINICE
```

```
;------
```

```
N20 DEF BOOL KOMUN=FALSE, ATTCODE=FALSE, ATTNAME=FALSE, _POLE[5], _PROBE_ACTIVE=FALSE
```

```
N30 DEF INT _P_C_DATA[12], _FG70, _FG90, _FWAL, NN, _CITAC, _HLASENI, _WORKOFF
```

```
N40 DEF STRING[10] _CAS, _DEN
```

```
N50 DEF REAL _P_C_C_DATA[35], _POZICE[30], _POMO[11], _XM_ACT_POS, _YM_ACT_POS
```

```
;------
```

```
;------
```

```
;MAIN PROGRAM
```

```
;------
```

```
N60 IF
```

```
((_HLAVA=="")AND(_KDOVOLA==0)AND(_NO==0)AND(_UHEL==0)AND(_DIA==0)AND(_LEN==0)AND(_C800_MO  
DE==0))
```

```
N70 GOTOF VYPIS
```

```
N80 ENDIF
```

```
N90 STOPRE
```

```
N100 IF (($_SEARCH)OR($_SIM))
```

```
N110 GOTOF KONEC
```

```
N120 ENDIF
```

```
N130 STOPRE
```

```
N140 IF NOT(ISFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_MESS_SPF"))
```

```
N150 MSG("!!! SUBPROGRAM PROBE_MESS.SPF IS UNLOADED !!!")
```

```
N160 REPEAT
```

```
N170 M0
```

```
N180 UNTIL TRUE AND FALSE
```

```
N190 ENDIF
```

```
N200 STOPRE
```

```
N210 IF
```

```
(ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_M_DATA_SPF"))OR(ISFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_M_DATA_SPF"))OR(ISFI  
LE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_M_DATA_SPF"))
```

```
N220 PROBE_M_DATA(_P_C_C_DATA)
```

```
N230 ELSE
```

```
N240 _HLASENI=38
```

```
N250 GOTOF CHYBA
```

```
N260 ENDIF
```

```
N270 STOPRE
N280 IF
(IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_P_DATA_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_P_DATA_SPF"))OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_P_DATA_SPF"))
N290 PROBE_P_DATA(_P_C_DATA)
N300 ELSE
N310 _HLASENI=43
N320 GOTOF CHYBA
N330 ENDIF
N340 STOPRE
N350 IF
(IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_POS_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_POS_SPF"))OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_POS_SPF"))
N360 PROBE_POS(_POZICE)
N370 ELSE
N380 _HLASENI=39
N390 GOTOF CHYBA
N400 ENDIF
N410 STOPRE
N420 IF
NOT((IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_WORK_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_WORK_SPF"))OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_WORK_SPF")))
N430 _HLASENI=40
N440 GOTOF CHYBA
N450 ENDIF
N460 STOPRE
N470 IF
NOT((IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_ROT_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_ROT_SPF"))OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_ROT_SPF")))
N480 _HLASENI=41
N490 GOTOF CHYBA
N500 ENDIF
N510 STOPRE
N520 IF
NOT((IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_DEF_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_DEF_SPF"))OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_DEF_SPF")))
N530 _HLASENI=42
N540 GOTOF CHYBA
N550 ENDIF
N560 _WORKOFF=$P_GG[8]
N570 IF _WORKOFF==0
N580 _HLASENI=28
N590 GOTOF CHYBA
N600 ENDIF
N610 STOPRE
N620 _CAL_P[1]=-1 _PROTNAME[1]=_HLAVA
N630 FOR _CITAC=0 TO 10
N640 _TXT[_CITAC]="XXXXXXXX"
N650 ENDFOR
N660 IF NOT ((_NO==0)OR(_NO==1)OR(_NO==2)OR(_NO==3)OR(_NO==4))
N670 _HLASENI=9 _TXT[9]="(_No)"
N680 GOTOF CHYBA
N690 ENDIF
N700 STOPRE
```



```
N710 IF
NOT((_C800_MODE==30)OR(_C800_MODE==27)OR(_C800_MODE==39)OR(_C800_MODE==45)OR(_C800_MOD
E==54)OR(_C800_MODE==57)OR(_C800_MODE==0))
N720 _HLASENI=9 _TXT[9]="(_C800)"
N730 GOTOF CHYBA
N740 ELSE
N750 IF ((_C800_MODE<>0)AND((_HLAVA=="COVER")OR(_HLAVA=="")))
N760 _HLASENI=9 _TXT[9]="(_HEAD)"
N770 GOTOF CHYBA
N780 ENDIF
N790 IF ((_C800_MODE==0)AND NOT((_HLAVA=="COVER")OR(_HLAVA=="")))
N800 _C800_MODE=30
N810 ENDIF
N820 ENDIF
N830 STOPRE
N840 WHILE $P_DRYRUN
N850 _HLASENI=1
N860 GOTOF CHYBA
N870 ENDWHILE
N880 IF $A_DBB[195]==0
N890 H9991
N900 G4 F0.5
N910 ELSE
N920 KOMUN=True
N930 ENDIF
N940 IF $A_DBB[149]==0
N950 PROBE_MESS(33)
N960 G4 F1.5
N970 RENW_OF
N980 MSG()
N990 _PROBE_ACTIVE=TRUE
N1000 ENDIF
N1010 STOPRE
N1020 IF (((_C800_MODE==6)AND($A_DBB[102]==10))OR((C800_MODE==6)AND($A_DBB[102]==17)))
N1030 _POMO[1]=50+$A_DBB[102]
N1040 ELSE
N1050 _POMO[1]=$A_DBB[102]
N1060 ENDIF
N1070 STOPRE
N1080 PROBE_DEF(1,0)
N1090 IF _CAL_P[4]<>1
N1100 _HLASENI=24
N1110 GOTOF CHYBA
N1120 ENDIF
N1130 IF NOT Komun
N1140 H9990
N1150 ENDIF
N1160 IF _CAL_P[2]<>_POMO[1]
N1170 _HLASENI=10
N1180 GOTOF CHYBA
N1190 ENDIF
N1200 STOPRE
N1210 _POMO[4]=_KDOVOLA*10
N1220 FOR _CITAC=0 TO 5
N1230 _POMO[2]=_POMO[4] MOD 10
```

```
N1240 IF ((_POMO[2]==0)OR(_POMO[2]==1))
N1250  _POMO[3]=_CITAC-1
N1260  IF _CITAC==0
N1270  _POMO[3]=1
N1280  ENDIF
N1290  IF _POMO[2]==0
N1300  _POLE[_POMO[3]]=0
N1310  ELSE
N1320  _POLE[_POMO[3]]=1
N1330  ENDIF
N1340  ELSE
N1350  _HLASENI=9 _TXT[9]="(_TYPE)"
N1360  GOTOF CHYBA
N1370  ENDIF
N1380  _POMO[4]=_POMO[4] DIV 10
N1390 ENDFOR
N1400 STOPRE
N1410 IF _POLE[2]==1
N1420  _CHBIT[10]=1
N1430  _CAL_P[0]=_P_C_DATA[3]
N1440  _CAL_P[1]=_P_C_DATA[4]
N1450  PROBE_WORK(_KDOVOLA,_DIA,_LEN,0,0,0)
N1460  IF HLAVA==31
N1470  _P_C_C_DATA[25]=_P_C_C_DATA[25]+_P_C_C_DATA[28]
N1480  ELSE
N1490  _P_C_C_DATA[25]=_P_C_C_DATA[25]+_P_C_C_DATA[29]
N1500  ENDIF
N1510  GOTOF _SK_P_C
N1520  ENDIF
N1530  STOPRE
N1540  IF ((_UHEL<-360)OR(_UHEL>360))
N1550  _HLASENI=9 _TXT[9]="(_ANG)"
N1560  GOTOF CHYBA
N1570  ENDIF
N1580  STOPRE
N1590  IF ((_CAL_P[3]==1)AND(_No==0))
N1600  _HLASENI=13
N1610  GOTOF CHYBA
N1620  ENDIF
N1630  STOPRE
N1640  IF ((_CAL_P[3]==0)AND(_NO<>0))
N1650  _HLASENI=13
N1660  GOTOF CHYBA
N1670  ENDIF
N1680  STOPRE
N1690  _CAL_P[3]=0
N1700  _POMO[2]=0 _POMO[3]=_UHEL _POMO[4]=0 _POMO[1]=_C800_MODE
;-----
;-----
;POKRAC:
;-----
N1710 POKRAC:
N1720  _JM_I[4]=100
N1730  IF _P_C_DATA[6]==1
```

```
N1740 IF _P_C_DATA[5]==1
N1750  _JM_I[1]=_P_C_DATA[1]
N1760 ELSE
N1770  _JM_I[1]=_P_C_DATA[2]
N1780 ENDIF
N1790 ENDIF
N1800 IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_P_WORK_SPF"))
N1810  P_WORK
N1820 ELSE
N1830  _HLASENI=11
N1840  GOTOF CHYBA
N1850 ENDIF
N1860 STOPRE
N1870 MESS(77,NN," ")
N1880 M5 M9 M41
N1890 IF ((NEW_TOOL_NAME<>"PROBE")OR(NEW_TOOL_NO<>14))
N1900  _TXT[8]=" "
N1910 IF (HLAVA==31)
N1920  PROBE_MESS(27)
N1930  M0
N1940  PROBE_MESS(35)
N1950  M0
N1960  MSG()
N1970  RS(1)
N1980  G1 DO Y=_P_C_C_DATA[32] F=_P_C_C_DATA[16]
N1990  T="PROBE"
N2000  M6
N2010 ELSE
N2020  PROBE_MESS(27)
N2030  M0
N2040  PROBE_MESS(35)
N2050  M0
N2060  MSG()
N2070  G1 DO Y=_P_C_C_DATA[32] F=_P_C_C_DATA[16]
N2080  T="PROBE"
N2090  M6
N2100 ENDIF
N2110 ENDIF
N2120 STOPRE
N2130 IF HLAVA==31
N2140  _P_C_C_DATA[25]=_P_C_C_DATA[25]+_P_C_C_DATA[28]
N2150 ELSE
N2160  _P_C_C_DATA[25]=_P_C_C_DATA[25]+_P_C_C_DATA[29]
N2170 ENDIF
N2180 D1
N2190 _POMO[10]=$P_TOOLL[1]+$P_TOOLL[3]
N2200 IF _POMO[10]<=0
N2210  _HLASENI=34
N2220  GOTOF CHYBA
N2230 ENDIF
N2240 STOPRE
N2250 IF (((ABS(_POMO[10]-(_P_C_C_DATA[26]+_P_C_C_DATA[25])))<(-
(_P_C_C_DATA[30])))OR((ABS(_POMO[10]-(_P_C_C_DATA[26]+_P_C_C_DATA[25])))>(_P_C_C_DATA[30])))
N2260  _CAL_P[1]=-1
N2270  _HLASENI=16
```

```
N2280 GOTOF CHYBA
N2290 ENDIF
N2300 STOPRE
N2310 IF ((($_P_TOOLR-_P_C_C_DATA[27])<(-(_P_C_C_DATA[31])))OR(($_P_TOOLR-
_P_C_C_DATA[27])>(_P_C_C_DATA[31])))
N2320 _CAL_P[1]=-1
N2330 _HLASENI=17
N2340 GOTOF CHYBA
N2350 ENDIF
N2360 STOPRE
N2370 IF _WORKOFF<>100
N2380 PROBE_MESS(2)
N2390 ELSE
N2400 PROBE_MESS(18)
N2410 ENDIF
N2420 MO
N2430 PROBE_MESS(23)
N2440 G599 D0
N2450 STOPRE
N2460 TRAFOOF
N2470 MCALL
N2480 DRFOF
N2490 GEOAX()
N2500 WALIMOF
N2510 _FG70=$_P_GG[13] _FG90=$_P_GG[14] _FWAL=$_P_GG[28]
N2520 G710 G90 G94
N2530 STOPRE
N2540 $_P_UIFR[99,X,FI]=0 $_P_UIFR[99,Y,FI]=0 $_P_UIFR[99,Z,FI]=0 $_P_UIFR[99,W,FI]=0
N2550 $_P_UIFR[99]=CTTRANS(X,0,Y,0,Z,0,W,0)
N2560 _CBIT[14]=0 _CHBIT[10]=0 _CHBIT[15]=1
N2570 CYCLE800()
N2580 STOPRE
N2590 PROBE_MESS(23)
N2600 G599 D1 G90 G64 G17
N2610 IF(ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N2620 SERVISTOP
N2630 ENDIF
N2640 IF HLAVA==31
N2650 G1 D0 SUPA Z0 W0 F=_P_C_C_DATA[17]
N2660 IF _P_C_C_DATA[7]==1
N2670 SUPA SPOS=ACP(0)
N2680 ELSE
N2690 H19=ACP(0)
N2700 ENDIF
N2710 ELSE
N2720 G1 D0 SUPA Z0 F=_P_C_C_DATA[17]
N2730 ENDIF
N2740 _XM_ACT_POS=$_AA_IM[X]
N2750 STOPRE
N2760 IF(ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N2770 SERVISTOP
N2780 ENDIF
N2790 IF ((_XM_ACT_POS<_P_C_C_DATA[1])OR(_XM_ACT_POS>_P_C_C_DATA[2]))
N2800 IF ((_XM_ACT_POS>_P_C_C_DATA[8])AND(_XM_ACT_POS<_P_C_C_DATA[7]))
N2810 PROBE_MESS(22)
```

```
N2820 MO
N2830 G1 SUPA X=_P_C_C_DATA[9] F=_P_C_C_DATA[16]
N2840 ENDF
N2850 IF ((_XM_ACT_POS>_P_C_C_DATA[11])AND(_XM_ACT_POS<_P_C_C_DATA[10]))
N2860 PROBE_MESS(22)
N2870 MO
N2880 G1 SUPA X=_P_C_C_DATA[12] F=_P_C_C_DATA[16]
N2890 ENDF
N2900 IF ((_XM_ACT_POS>_P_C_C_DATA[14])AND(_XM_ACT_POS<_P_C_C_DATA[13]))
N2910 PROBE_MESS(22)
N2920 MO
N2930 G1 SUPA X=_P_C_C_DATA[15] F=_P_C_C_DATA[16]
N2940 ENDF
N2950 PROBE_MESS(23)
N2960 G1 F=_P_C_C_DATA[18] SUPA Y=_POZICE[21]
N2970 G1 F=_P_C_C_DATA[18] SUPA X=_P_C_C_DATA[5]
N2980 G1 SUPA Y=_P_C_C_DATA[6] F=_P_C_C_DATA[16]
N2990 ENDF
N3000 PROBE_MESS(15)
N3010 STOPRE
N3020 CASE _NO OF 0 GOTOF CCC 1 GOTOF AAA 2 GOTOF BBB 3 GOTOF DDD DEFAULT GOTOF EEE
N3030 AAA:
N3040 _POMO[2]=-90 _POMO[10]=0 _POMO[5]=_POZICE[4] _POMO[6]=_POZICE[5] _POMO[7]=_POZICE[6]
_POMO[8]=_POZICE[14] _POMO[9]=_POZICE[18]
N3050 GOTOF KALIBRACE
N3060 BBB:
N3070 _POMO[2]=90 _POMO[10]=0 _POMO[5]=_POZICE[7] _POMO[6]=_POZICE[8] _POMO[7]=_POZICE[9]
_POMO[8]=_POZICE[15] _POMO[9]=_POZICE[19]
N3080 GOTOF KALIBRACE
N3090 CCC:
N3100 _POMO[2]=0 _POMO[10]=0 _POMO[5]=_POZICE[1] _POMO[6]=_POZICE[2] _POMO[7]=_POZICE[3]
_POMO[8]=_POZICE[13] _POMO[9]=_POZICE[17]
N3110 GOTOF KALIBRACE
N3120 DDD:
N3130 _POMO[2]=0 _POMO[10]=-90 _POMO[5]=_POZICE[10] _POMO[6]=_POZICE[11]
_POMO[7]=_POZICE[12] _POMO[8]=_POZICE[16] _POMO[9]=_POZICE[20]
N3140 GOTOF KALIBRACE
N3150 EEE:
N3160 _HLASENI=9 _TXT[9]="(_No)"
N3170 GOTOF CHYBA
N3180 STOPRE
;-----
;-----
;KALIBRACE
;-----
N3190 KALIBRACE:
N3200 $P_UIFR[99]=CTTRANS(X,_POMO[5],Y,_POMO[6],Z,_POMO[7],W,0)
N3210 _YM_ACT_POS=$AA_IM[Y]
N3220 IF ((_YM_ACT_POS)<(_P_C_C_DATA[6]))
N3230 SUPA G1 Y=_P_C_C_DATA[6] F=_P_C_C_DATA[16]
N3240 ENDF
N3250 IF HLAVA==31
N3260 _CAL_P[0]=_P_C_DATA[3]
N3270 _CAL_P[1]=_P_C_DATA[4]
```

```
N3280 _PROTNAME[2]=_HLAVA
N3290 CYCLE800()
N3300 IF _P_C_DATA[7]==1
N3310     SUPA SPOS=ACP(360-_UHEL)
N3320     ELSE
N3330     H19=ACP(360-_UHEL)
N3340     ENDIF
N3350 ROT Z=_UHEL
N3360 ELSE
N3370 ROT Z=0
N3380 PROBE_MESS(3)
N3390 M0
N3400 STOPRE
N3410 IF ((_UHEL<>0)AND(_NO==0))
N3420     _POMO[3]=0
N3430     ROT Z=_UHEL
N3440     ENDIF
N3450 STOPRE
N3460 _CAL_P[0]=_P_C_DATA[3]
N3470 _CAL_P[1]=_P_C_DATA[4]
N3480 _PROTNAME[2]=_HLAVA
N3490 _CAL_P[3]=_POMO[1] _CAL_P[4]=_POMO[2] _CAL_P[5]=_POMO[10]
N3500 PROBE_ROT(_HLAVA,_POMO[1],_POMO[10],_POMO[2],_POMO[3],0)
N3510 ENDIF
N3520 PROBE_MESS(15)
N3530 D0 SUPA X=_POZICE[1] F=_P_C_C_DATA[16]
N3540 G599 D1
N3550 MESS(77,NN," ")
N3560 IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N3570     SERVISTOP
N3580     ENDIF
N3590 G599 D1
N3600 RENW_ON
N3610 PROBE_MESS(15)
N3620 MEAS=1 G1 Z=_P_C_C_DATA[20] F=_P_C_C_DATA[16]
N3630 IF $AC_MEA[1]==1
N3640     _HLASENI=14
N3650     GOTOF CHYBA
N3660     ENDIF
N3670 IF ((_POLE[0]==0)OR(_POLE[3]==1))
N3680     MEAS=1 G1 Y=_P_C_C_DATA[24] X=_P_C_C_DATA[23] F=_P_C_C_DATA[17]
N3690     IF $AC_MEA[1]==1
N3700         _HLASENI=14
N3710         GOTOF CHYBA
N3720         ENDIF
N3730     MEAS=1 G1 Z=_P_C_C_DATA[19] F=_P_C_C_DATA[17]
N3740     IF $AC_MEA[1]==1
N3750         _HLASENI=14
N3760         GOTOF CHYBA
N3770         ENDIF
N3780     ELSE
N3790     MEAS=1 G1 Y=_P_C_C_DATA[22] X=_P_C_C_DATA[21] F=_P_C_C_DATA[17]
N3800     IF $AC_MEA[1]==1
N3810         _HLASENI=14
N3820         GOTOF CHYBA
```

```
N3830  ENDIF
N3840  ENDIF
N3850  RENW_OF
N3860  IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N3870  SERVISTOP
N3880  ENDIF
N3890  IF ((_UHEL<>0)AND(_NO==0))
N3900  ROT Z=_UHEL
N3910  _CAL_P[6]=110
N3920  G599 D1
N3930  ENDIF
N3940  PROBE_WORK(_KDOVOLA,_POMO[8],_POMO[9],_P_C_C_DATA[21],_P_C_C_DATA[22],
_P_C_C_DATA[20])
N3950  MESS(77,NN," ")
N3960  CYCLE800()
N3970  ROT Z=0
N3980  G1 F=_P_C_C_DATA[18] DO SUPA ZO
N3990  G1 F=_P_C_C_DATA[18] SUPA X=_P_C_C_DATA[3] Y=_P_C_C_DATA[4]
N4000  _SK_P_C:
N4010  GOTOF END
;-----
;-----
;CHYBA:
;-----
N4020  CHYBA:
N4030  _CHBIT[10]=1
N4040  _CAL_P[1]=-1
N4050  IF _WORKOFF<>0
N4060  G[8]=_WORKOFF
N4070  ENDIF
N4080  RENW_OF
N4090  PROBE_MESS(_HLASENI)
N4100  REPEAT
N4110  MO
N4120  UNTIL TRUE AND FALSE
;-----
;-----
;END
;-----
N4130  END:
N4140  _CAL_P[1]=9 _CAL_P[3]=ACTUAL_ANGLE_OF_HIRT_1 _CAL_P[4]=ACTUAL_ANGLE_OF_HIRT_2 _CITAC=0
N4150  MESS(77,NN," ")
N4160  IF _P_C_DATA[6]==1
N4170  IF _JM_I[1]==_P_C_DATA[1]
N4180  FOR _CITAC=0 TO 10
N4190  _WP[0,_CITAC]=_WP[1,_CITAC]
N4200  ENDFOR
N4210  ELSE
N4220  IF _JM_I[1]==_P_C_DATA[2]
N4230  FOR _CITAC=0 TO 10
N4240  _WP[0,_CITAC]=_WP[2,_CITAC]
N4250  ENDFOR
N4260  ENDIF
```

```
N4270 IF ((_JM_I[1]<>_P_C_DATA[1])OR(_JM_I[1]<>_P_C_DATA[2]))
N4280   _HLASENI=32
N4290   GOTOB CHYBA
N4300   ENDIF
N4310   ENDIF
N4320   ENDIF
N4330   D1
N4340   _POMO[10]=$P_TOOLL[1]+$P_TOOLL[3]
N4350   IF (((ABS(_POMO[10]-(_P_C_C_DATA[26]+_P_C_C_DATA[25]))<-
(_P_C_C_DATA[30]))OR((ABS(_POMO[10]-(_P_C_C_DATA[26]+_P_C_C_DATA[25]))>(_P_C_C_DATA[30])))
N4360   _CAL_P[1]=-1
N4370   _HLASENI=16
N4380   GOTOB CHYBA
N4390   ENDIF
N4400   IF (((($P_TOOLR-_P_C_C_DATA[27])<-( _P_C_C_DATA[31])))OR((($P_TOOLR-
_P_C_C_DATA[27])>(_P_C_C_DATA[31])))
N4410   _CAL_P[1]=-1
N4420   _HLASENI=17
N4430   GOTOB CHYBA
N4440   ENDIF
N4450   D0
N4460   IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N4470   SERVISTOP
N4480   ENDIF
N4490   IF _POLE[2]==0
N4500   IF _FWAL==1
N4510   WALIMON
N4520   ELSE
N4530   WALIMOF
N4540   ENDIF
N4550   CASE _FG70 OF 1 GOTOF LG70 2 GOTOF LG71 3 GOTOF LG700 4 GOTOF LG710
N4560   LG70:
N4570   G70
N4580   GOTOF CONT
N4590   LG71:
N4600   G71
N4610   GOTOF CONT
N4620   LG700:
N4630   G700
N4640   GOTOF CONT
N4650   LG710:
N4660   G710
N4670   CONT:
N4680   IF _FG90==1
N4690   G90
N4700   ELSE
N4710   G91
N4720   ENDIF
N4730   ENDIF
N4740   _CHBIT[10]=1
N4750   G[8]=_WORKOFF
N4760   _CAL_P[6]=0
N4770   IF _WORKOFF<>100
N4780   FOR _CITAC=1 TO _WORKOFF
N4790   IF ((_WORKOFF>=2)AND(_WORKOFF<=5))
```



```
N4800  _CAL_P[6]=52+_CITAC
N4810  ELSE
N4820  _CAL_P[6]=499+_CITAC
N4830  ENDIF
N4840  ENDFOR
N4850  PROBE_MESS(20)
N4860  G4 F5
N4870  ENDIF
N4880  CYCLE113(1,_DEN)
N4890  CYCLE113(2,_CAS)
N4900  _TXT[3]=_CAS _TXT[4]=_DEN
N4910  _CAL_P[0]=_KDOVOLA _CAL_P[5]=_NO _CAL_P[6]=_UHEL
N4920  IF _PROBE_ACTIVE==TRUE
N4930  PROBE_MESS(33)
N4940  G4 F1.5
N4950  RENW_ON
N4960  ENDIF
N4970  PROBE_MESS(37)
N4980  G4 F1.5
N4990  GOTOF KONEC
;-----
;-----
;VYPIS
;-----
N5000  VYPIS:
N5010  IF _CAL_P[1]<>9
N5020  PROBE_MESS(19)
N5030  ELSE
N5040  _POMO[4]=_CAL_P[0]*10
N5050  FOR _CITAC=0 TO 5
N5060  _POMO[2]=_POMO[4] MOD 10
N5070  IF ((_POMO[2]==0)OR(_POMO[2]==1))
N5080  _POMO[3]=_CITAC-1
N5090  IF _CITAC==0
N5100  _POMO[3]=1
N5110  ENDIF
N5120  IF _POMO[2]==0
N5130  _POLE[_POMO[3]]=0
N5140  ELSE
N5150  _POLE[_POMO[3]]=1
N5160  ENDIF
N5170  ENDIF
N5180  _POMO[4]=_POMO[4] DIV 10
N5190  ENDFOR
N5200  IF (_POLE[4]==1)
N5210  _TXT[1]="MONO + MULTI"
N5220  ELSE
N5230  IF (_POLE[1]==1)
N5240  _TXT[1]="MONO"
N5250  ELSE
N5260  _TXT[1]="MULTI"
N5270  ENDIF
N5280  ENDIF
N5290  IF (_POLE[3]==1)
```

```
N5300  _TXT[5]=" D + L"  
N5310  ELSE  
N5320  IF (_POLE[1]==1)  
N5330  _TXT[5]=" D "  
N5340  ELSE  
N5350  _TXT[5]=" L "  
N5360  ENDF  
N5370  ENDF  
N5380  PROBE_DEF(0,1)  
N5390  IF (_POLE[2]==1)  
N5400  _TXT[2]=" C800 "  
N5410  PROBE_MESS(26)  
N5420  ELSE  
N5430  _TXT[2]=" "  
N5440  PROBE_MESS(21)  
N5450  ENDF  
N5460  ENDF  
N5470  MO  
N5480  GOTOF KONEC  
;-----  
  
;-----  
;KONEC  
;-----  
N5490 KONEC:  
N5500 D1  
N5510 MSG()  
N5520 M17
```

PŘÍLOHA č.2

Kalibrační cyklus pro technologická zařízení HEAD_CALIB

```
N10 PROC HEAD_CALIB (STRING[30] _HLAVA, BOOL _CALIB_INFO) SAVE DISPLOF
; $PATH=/_N_CUS_DIR

; HEAD_INFO - INFO O VSECH PROMENNYCH ATD.

;-----
; DEFINICE
;-----
N20 DEF BOOL KOMUN=FALSE, ATTCODE=FALSE, ATTNAME=FALSE, _POLE[5],
    _PROBE_ACTIVE=FALSE
N30 DEF INT _P_C_DATA[12], _FG70, _FG90, _FWAL, NN, _CITAC, _HLASENI, _WORKOFF,
    _NO
N40 DEF STRING[10] _CAS, _DEN
N50 DEF REAL _P_C_C_DATA[35], _POZICE[30], _POMO[11], _XM_ACT_POS, _YM_ACT_POS
;-----

;-----
; MAIN PROGRAM
;-----
N60 IF ((_HLAVA=="")AND(_CALIB_INFO==0))
N70 GOTO VYPIS
N80 ENDIF
N90 STOPRE
N100 IF (($P_SEARCH)OR($P_SIM))
N110 GOTO KONEC
N120 ENDIF
N130 STOPRE
N140 IF NOT(ISFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_MESS_SPF"))
N150 MSG("!!! SUBPROGRAM PROBE_MESS.SPF IS UNLOADED !!!")
N160 REPEAT
N170 M0
N180 UNTIL TRUE AND FALSE
N190 ENDIF
N200 STOPRE
N210 IF
    (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_M_DATA_SPF"))OR(ISFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_M
    _DATA_SPF"))OR(ISFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_M_DATA_SPF"))
N220 PROBE_M_DATA(_P_C_C_DATA)
N230 ELSE
N240 _HLASENI=38
N250 GOTO CHYBA
N260 ENDIF
N270 STOPRE
N280 IF
    (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_P_DATA_SPF"))OR(ISFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_P_D
    ATA_SPF"))OR(ISFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_P_DATA_SPF"))
```

```
N290 PROBE_P_DATA(_P_C_DATA)
N300 ELSE
N310 _HLASENI=43
N320 GOTOF CHYBA
N330 ENDIF
N340 STOPRE
N350 IF
(IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_POS_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_POS_SP
F"))OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_POS_SPF"))
N360 PROBE_POS(_POZICE)
N370 ELSE
N380 _HLASENI=39
N390 GOTOF CHYBA
N400 ENDIF
N410 STOPRE
N420 IF
(IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_HEAD_DEF_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_HEAD_DEF_SPF")
)OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_HEAD_DEF_SPF"))
N430 HEAD_DEF(_POZICE)
N440 ELSE
N450 _HLASENI=45
N460 GOTOF CHYBA
N470 ENDIF
N480 STOPRE
N490 IF
NOT(((IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_WORK_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_
WORK_SPF"))OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_WORK_SPF"))))
N500 _HLASENI=40
N510 GOTOF CHYBA
N520 ENDIF
N530 STOPRE
N540 IF
NOT(((IFILE("/_N_CMA_DIR/_N_PROBE_DEF_SPF"))OR(IFILE("/_N_CUS_DIR/_N_PROBE_DE
F_SPF"))OR(IFILE("/_N_SPF_DIR/_N_PROBE_DEF_SPF"))))
N550 _HLASENI=42
N560 GOTOF CHYBA
N570 ENDIF
N580 _WORKOFF=$P_GG[8]
N590 IF _WORKOFF==0
N600 _HLASENI=28
N610 GOTOF CHYBA
N620 ENDIF
N630 STOPRE
N640 _HEAD_P[1]=-1 _PROTNAME[1]=_HLAVA
N650 FOR _CITAC=0 TO 10
N660 _TXT[_CITAC]="XXXXXXXXX"
```

```
N670 ENDFOR
N680 STOPRE
N690 IF ((_C800_MODE<>0)AND((_HLAVA=="COVER")OR(_HLAVA=="")))
N700  _HLASENI=9 _TXT[9]="(_HEAD)"
N710  GOTOF CHYBA
N720 ENDIF
N730 IF ((_C800_MODE==0)AND NOT((_HLAVA=="COVER")OR(_HLAVA=="")))
N740  _C800_MODE=30
N750 ENDIF
N760 ENDIF
N770 STOPRE
N780 WHILE $P_DRYRUN
N790  _HLASENI=1
N800  GOTOF CHYBA
N810 ENDWHILE
N820 IF $A_DBB[195]==0
N830  H9991
N840  G4 F0.5
N850 ELSE
N860  KOMUN=True
N870 ENDIF
N880 IF $A_DBB[149]==0
N890  PROBE_MESS(33)
N900  G4 F1.5
N910  RENW_OF
N920  MSG()
N930  _PROBE_ACTIVE=TRUE
N940 ENDIF
N950 STOPRE
N960 IF
((( $A_DBB[182]==6)AND($A_DBB[102]==10))OR(( $A_DBB[182]==6)AND($A_DBB[102]==17))
)
N970  _POMO[1]=50+$A_DBB[102]
N980 ELSE
N990  _POMO[1]=$A_DBB[102]
N1000 ENDIF
N1010 STOPRE
N1020 PROBE_DEF(1,0)
N1030 IF _HEAD_P[4]<>1
N1040  _HLASENI=24
N1050  GOTOF CHYBA
N1060 ENDIF
N1070 IF NOT Komun
N1080  H9990
N1090 ENDIF
N1100 IF _HEAD_P[2]<>_POMO[1]
```

```
N1110 _HLASENI=10
N1120 GOTOF CHYBA
N1130 ENDIF
N1140 STOPRE
N1150 IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_P_WORK_SPF"))
N1160 P_WORK
N1170 ELSE
N1180 _HLASENI=11
N1190 GOTOF CHYBA
N1200 ENDIF
N1210 STOPRE
N1220 MESS(77,NN," ")
N1230 M5 M9 M41
N1240 IF ((NEW_TOOL_NAME<>"PROBE")OR(NEW_TOOL_NO<>14))
N1250 _TXT[8]=" "
N1260 IF (HLAVA==31)
N1270 PROBE_MESS(27)
N1280 M0
N1290 PROBE_MESS(35)
N1300 M0
N1310 MSG()
N1320 RS(1)
N1330 G1 D0 Y=_P_C_C_DATA[32] F=_P_C_C_DATA[16]
N1340 T="PROBE"
N1350 M6
N1360 ELSE
N1370 PROBE_MESS(27)
N1380 M0
N1390 PROBE_MESS(35)
N1400 M0
N1410 MSG()
N1420 G1 D0 Y=_P_C_C_DATA[32] F=_P_C_C_DATA[16]
N1430 T="PROBE"
N1440 M6
N1450 ENDIF
N1460 ENDIF
N1470 PROBE_MESS(23)
N1480 G599 D0
N1490 STOPRE
N1500 TRAFOOF
N1510 MCALL
N1520 DRFOF
N1530 GEOAX()
N1540 WALIMOF
N1550 _FG70=$P_GG[13] _FG90=$P_GG[14] _FWAL=$P_GG[28]
N1560 G710 G90 G94
```

```
N1570 STOPRE
N1580 $P_UIFR[99,X,FI]=0 $P_UIFR[99,Y,FI]=0 $P_UIFR[99,Z,FI]=0 $P_UIFR[99,W,FI]=0
N1590 $P_UIFR[99]=CTTRANS(X,0,Y,0,Z,0,W,0)
N1600 _CBIT[14]=0 _CHBIT[10]=0 _CHBIT[15]=1
N1610 CYCLE800()
N1620 STOPRE
N1630 PROBE_MESS(23)
N1640 G599 D1 G90 G64 G17
N1650 IF(ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N1660  SERVISTOP
N1670 ENDIF
N1680 _XM_ACT_POS=$AA_IM[X]
N1690 STOPRE
N1700 IF(ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N1710  SERVISTOP
N1720 ENDIF
N1730 IF ((_XM_ACT_POS<_P_C_C_DATA[1])OR(_XM_ACT_POS>_P_C_C_DATA[2]))
N1740 IF ((_XM_ACT_POS>_P_C_C_DATA[8])AND(_XM_ACT_POS<_P_C_C_DATA[7]))
N1750  PROBE_MESS(22)
N1760  M0
N1770  G1 SUPA X=_P_C_C_DATA[9] F=_P_C_C_DATA[16]
N1780  ENDIF
N1790 IF ((_XM_ACT_POS>_P_C_C_DATA[11])AND(_XM_ACT_POS<_P_C_C_DATA[10]))
N1800  PROBE_MESS(22)
N1810  M0
N1820  G1 SUPA X=_P_C_C_DATA[12] F=_P_C_C_DATA[16]
N1830  ENDIF
N1840 IF ((_XM_ACT_POS>_P_C_C_DATA[14])AND(_XM_ACT_POS<_P_C_C_DATA[13]))
N1850  PROBE_MESS(22)
N1860  M0
N1870  G1 SUPA X=_P_C_C_DATA[15] F=_P_C_C_DATA[16]
N1880  ENDIF
N1890  PROBE_MESS(23)
N1900  G1 F=_P_C_C_DATA[18] SUPA Y=_POZICE[21]
N1910  G1 F=_P_C_C_DATA[18] SUPA X=_P_C_C_DATA[5]
N1920  G1 SUPA Y=_P_C_C_DATA[6] F=_P_C_C_DATA[16]
N1930  ENDIF
N1940  PROBE_MESS(15)
N1950  STOPRE
N1960  CASE _HEAD_P[3] OF 0 GOTOF CCC 1 GOTOF AAA 2 GOTOF BBB DEFAULT GOTOF EEE
N1970  AAA:
N1980  _POMO[2]=-90 _POMO[10]=0 _POMO[5]=_POZICE[4] _POMO[6]=_POZICE[5]
  _POMO[7]=_POZICE[6] _POMO[8]=_POZICE[14] _POMO[9]=_POZICE[18]
N1990  GOTOF KALIBRACE
N2000  BBB:
```



```
N2010 _POMO[2]=90 _POMO[10]=0 _POMO[5]=_POZICE[7] _POMO[6]=_POZICE[8]
_POMO[7]=_POZICE[9] _POMO[8]=_POZICE[15] _POMO[9]=_POZICE[19]
N2020 GOTOF KALIBRACE
N2030 CCC:
N2040 _POMO[2]=0 _POMO[10]=0 _POMO[5]=_POZICE[1] _POMO[6]=_POZICE[2]
_POMO[7]=_POZICE[3] _POMO[8]=_POZICE[13] _POMO[9]=_POZICE[17]
N2050 GOTOF KALIBRACE
N2060 DDD:
N2070 _POMO[2]=0 _POMO[10]=-90 _POMO[5]=_POZICE[10] _POMO[6]=_POZICE[11]
_POMO[7]=_POZICE[12] _POMO[8]=_POZICE[16] _POMO[9]=_POZICE[20]
N2080 GOTOF KALIBRACE
N2090 EEE:
N2100 _HLASENI=9 _TXT[9]="(_No)"
N2110 GOTOF CHYBA
N2120 STOPRE
;-----

;-----
;KALIBRACE
;-----

N2130 KALIBRACE:
N2140 $P_UIFR[99]=CTTRANS(X,_POMO[5],Y,_POMO[6],Z,_POMO[7],W,0)
N2150 _YM_ACT_POS=$AA_IM[Y]
N2160 IF ((_YM_ACT_POS)<(_P_C_C_DATA[6]))
N2170 SUPA G1 Y=_P_C_C_DATA[6] F=_P_C_C_DATA[16]
N2180 ENDIF
N2190 PROBE_MESS(15)
N2200 DO SUPA X=_POZICE[1] F=_P_C_C_DATA[16]
N2210 G599 D1
N2220 MESS(77,NN," ")
N2230 IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N2240 SERVISTOP
N2250 ENDIF
N2260 G599 D1
N2270 RENW_ON
N2280 PROBE_MESS(15)
N2290 MEAS=1 G1 Z=_P_C_C_DATA[20] F=_P_C_C_DATA[16]
N2300 IF $AC_MEA[1]==1
N2310 _HLASENI=14
N2320 GOTOF CHYBA
N2330 ENDIF
N2340 IF ((_POLE[0]==0)OR(_POLE[3]==1))
N2350 MEAS=1 G1 Y=_P_C_C_DATA[24] X=_P_C_C_DATA[23] F=_P_C_C_DATA[17]
N2360 IF $AC_MEA[1]==1
N2370 _HLASENI=14
N2380 GOTOF CHYBA
```

```
N2390  ENDIF
N2400  MEAS=1 G1 Z=_P_C_C_DATA[19] F=_P_C_C_DATA[17]
N2410  IF $AC_MEA[1]==1
N2420  _HLASENI=14
N2430  GOTOF CHYBA
N2440  ENDIF
N2450  ELSE
N2460  MEAS=1 G1 Y=_P_C_C_DATA[22] X=_P_C_C_DATA[21] F=_P_C_C_DATA[17]
N2470  IF $AC_MEA[1]==1
N2480  _HLASENI=14
N2490  GOTOF CHYBA
N2500  ENDIF
N2510  ENDIF
N2520  RENW_OF
N2530  IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N2540  SERVISTOP
N2550  ENDIF
N2560  HEAD_WORK(_POMO[8],_POMO[9],_P_C_C_DATA[21], _P_C_C_DATA[22],
_P_C_C_DATA[20])
N2570  MESS(77,NN," ")
N2580  CYCLE800()
N2590  G1 F=_P_C_C_DATA[18] DO SUPA Z0
N2600  G1 F=_P_C_C_DATA[18] SUPA X=_P_C_C_DATA[3] Y=_P_C_C_DATA[4]
N2610  _SK_P_C:
N2620  GOTOF END
;-----

;-----
;CHYBA:
;-----
N2630  CHYBA:
N2640  _CHBIT[10]=1
N2650  _HEAD_P[1]=-1
N2660  IF _WORKOFF<>0
N2670  G[8]=_WORKOFF
N2680  ENDIF
N2690  RENW_OF
N2700  PROBE_MESS(_HLASENI)
N2710  REPEAT
N2720  M0
N2730  UNTIL TRUE AND FALSE
;-----

;-----
;END
;-----
```

```
N2740 END:
N2750 _HEAD_P[1]=9 _HEAD_P[3]=ACTUAL_ANGLE_OF_HIRT_1
      _HEAD_P[4]=ACTUAL_ANGLE_OF_HIRT_2 _CITAC=0
N2760 MESS(77,NN," ")
N2770 IF _P_C_DATA[6]==1
N2780 IF _JM_I[1]==_P_C_DATA[1]
N2790   FOR _CITAC=0 TO 10
N2800   _WP[0,_CITAC]=_WP[1,_CITAC]
N2810   ENDFOR
N2820 ELSE
N2830 IF _JM_I[1]==_P_C_DATA[2]
N2840   FOR _CITAC=0 TO 10
N2850   _WP[0,_CITAC]=_WP[2,_CITAC]
N2860   ENDFOR
N2870   ENDIF
N2880 IF ((_JM_I[1]<>_P_C_DATA[1])OR(_JM_I[1]<>_P_C_DATA[2]))
N2890   _HLASENI=32
N2900   GOTOB CHYBA
N2910   ENDIF
N2920 ENDIF
N2930 ENDIF
N2940 D1
N2950 _POMO[10]=$P_TOOLL[1]+$P_TOOLL[3]
N2960 IF (((ABS(_POMO[10]-(_P_C_C_DATA[26]+_P_C_C_DATA[25])))<-
      (_P_C_C_DATA[30]))OR((ABS(_POMO[10]-
      (_P_C_C_DATA[26]+_P_C_C_DATA[25])))>(_P_C_C_DATA[30])))
N2970 _HEAD_P[1]=-1
N2980 _HLASENI=16
N2990 GOTOB CHYBA
N3000 ENDIF
N3010 IF (((($P_TOOLR-_P_C_C_DATA[27])<-( _P_C_C_DATA[31])))OR((($P_TOOLR-
      _P_C_C_DATA[27])>(_P_C_C_DATA[31])))
N3020 _HEAD_P[1]=-1
N3030 _HLASENI=17
N3040 GOTOB CHYBA
N3050 ENDIF
N3060 DO
N3070 IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_SERVISTOP_SPF"))
N3080 SERVISTOP
N3090 ENDIF
N3100 IF _POLE[2]==0
N3110 IF _FWAL==1
N3120   WALIMON
N3130 ELSE
N3140   WALIMOF
N3150 ENDIF
```

```
N3160 CASE _FG70 OF 1 GOTOF LG70 2 GOTOF LG71 3 GOTOF LG700 4 GOTOF LG710
N3170 LG70:
N3180 G70
N3190 GOTOF CONT
N3200 LG71:
N3210 G71
N3220 GOTOF CONT
N3230 LG700:
N3240 G700
N3250 GOTOF CONT
N3260 LG710:
N3270 G710
N3280 CONT:
N3290 IF _FG90==1
N3300 G90
N3310 ELSE
N3320 G91
N3330 ENDIF
N3340 ENDIF
N3350 _CHBIT[10]=1
N3360 G[8]=_WORKOFF
N3370 _HEAD_P[6]=0
N3380 IF _WORKOFF<>100
N3390 FOR _CITAC=1 TO _WORKOFF
N3400 IF ((_WORKOFF>=2)AND(_WORKOFF<=5))
N3410 _HEAD_P[6]=52+_CITAC
N3420 ELSE
N3430 _HEAD_P[6]=499+_CITAC
N3440 ENDIF
N3450 ENDFOR
N3460 PROBE_MESS(20)
N3470 G4 F5
N3480 ENDIF
N3490 CYCLE113(1,_DEN)
N3500 CYCLE113(2,_CAS)
N3510 _TXT[3]=_CAS _TXT[4]=_DEN
N3520 _HEAD_P[5]=_NO
N3530 IF _PROBE_ACTIVE==TRUE
N3540 PROBE_MESS(33)
N3550 G4 F1.5
N3560 RENW_ON
N3570 ENDIF
N3580 PROBE_MESS(37)
N3590 G4 F1.5
N3600 GOTOF KONEC
;-----
```

```
;-----  
;VYPIS  
;-----  
N3610 VYPIS:  
N3620 IF _HEAD_P[1]<>9  
N3630 PROBE_MESS(19)  
N3640 PROBE_DEF(0,1)  
N3650 IF (_POLE[2]==1)  
N3660 _TXT[2]=" C800 "  
N3670 PROBE_MESS(26)  
N3680 ELSE  
N3690 _TXT[2]=" "  
N3700 PROBE_MESS(21)  
N3710 ENDIF  
N3720 ENDIF  
N3730 M0  
N3740 GOTOF KONEC  
;-----  
  
;-----  
;KONEC  
;-----  
N3750 KONEC:  
N3760 D1  
N3770 MSG()  
N3780 M17
```

PŘÍLOHA č.3

Cyklus pro přepočítání transformací CYCLE600

```
; $PATH=/_N_CUS_DIR
N10 PROC CYCLE600(BOOL _C800_OR_ROT_INPUT,STRING[30] _HLAVA,BOOL _SWING_OR_RECALCULATE,INT
 _BIN_KOM_10_INPUT,REAL _POS_X,REAL _POS_Y,REAL _POS_Z,REAL WING_X1,REAL WING_Y1,REAL
 WING_Z1,REAL _POS_X_NAT,REAL _POS_Y_NAT,REAL _POS_Z_NAT,BOOL _C800_OR_ROT_OUTPUT,INT
 _BIN_KOM_10_OUTPUT,BOOL _ROT_NEW_ADI,BOOL _ROTACE_INVERZ,BOOL _RETRACT_PRIOR_ROTATION)
SAVE ;DISPLOF

;-----
;SUBPROGRAM FOR CALCULATION OF THE INTRINSICS AND EXTRINSICS TRANSFORMATIONS
;-----
;SOURCE : A_20190410_LEH
;VERSION: B_20200513_LEH
;        C_20210909_LEH
;        D_20230127_LEH
;-----

;-----
;PARAMETERS EXPLANANTION
;-----
;_C800_OR_ROT_INPUT - INPUT INTRINSIC (=1) OR EXTRINSIC(=0) ROTATION
;_HLAVA - TECHNOLOGICAL ACCESSORIES
;_SWING_OR_RECALCULATE - (0) - ROTATION OF THE ACCESSORIE, (1) - RACELCULATION ONLY
;_BIN_KOM_10_INPUT - INPUT BINARY COMBINATION
;_POS_X - REFERENCE POINT BEFORE ROTATION IN X AXIS
;_POS_Y - REFERENCE POINT BEFORE ROTATION IN Y AXIS
;_POS_Z - REFERENCE POINT BEFORE ROTATION IN Z AXIS
;WING_X1 - ROTATION AROUND FIRST AXIS
;WING_Y1 - ROTATION AROUND SECOND AXIS
;WING_Z1 - ROTATION AROUND THIRD AXIS
;_POS_X_NAT - TRANSLATION OF REFERENCE POINT AFTER ROTATION IN X AXIS
;_POS_Y_NAT - TRANSLATION OF REFERENCE POINT AFTER ROTATION IN Y AXIS
;_POS_Z_NAT - TRANSLATION OF REFERENCE POINT AFTER ROTATION IN Z AXIS
;_C800_OR_ROT_OUTPUT - OUTPUT INTRINSIC (=1) OR EXTRINSIC(=0) ROTATION
;_BIN_KOM_10_OUTPUT - OUTPUT BINARY COMBINATION
;_ROT_NEW_ADI - NEW OR ADDITIVE OUTPUT ROTATION
;_ROTACE_INVERZ - INVERSE ROTATION OF THE ACCESSORIE (0) - NOT TO USE (1) - TO USE
;_RETRACT_PRIOR_ROTATION - (0) NOT TO RETRACT IN Z AXIS PRIOR ROTATION, (1) RETRACT IN Z AXIS PRIOR
ROTATION
;-----

;-----
;INFO
;-----
;NEEDED SUBPROGRAMMS: _HEAD_DEF_SPF
;VERSIONS:
;LEH 190410 - SOURCE
;LEH 200513 - ZMENA CYKLU A UPRAVA PRO NATACENI VNITRNI A VNEJSI
;LEH 210909 - PREDELANI PRO PREPOCET UHLU
;LEH 230127 - KOMPLET ZMENA CYKLU DLE DISERTACE
;LEH 230205 - PRIDANO DO UGUD DEF NCK REAL _MAT_VYS_ADD[4,4]
;        - PRIDANO DO UGUD DEF NCK INT _CYCLE600_KONT
;
;
```

```
;TEST: 230205,HCW2,Ob25002
```

```
;
```

```
;
```

```
;DEFINITIONS
```

```
;
```

```
N20 DEF REAL _MAT_ROT_X[4,4], _MAT_ROT_Y[4,4], _MAT_ROT_Z[4,4], _MAT_VEKTOR[4,4]
N30 DEF REAL _MAT_POM[4,4], _MAT_VYS[4,4], _MAT_AKT[4,4], _MAT_C800[4,4], _TILT_TABLE[4,4]
N40 DEF CHAR _MAT_PORADI_IN[3], _MAT_PORADI_OUT[3]
N50 DEF INT _MAT_VZOREC_IN[3], _MAT_VZOREC_OUT[3]
N60 DEF INT _MAT_LEIBNITZ[3,3]
N70 DEF REAL _TABLE_X=2000, _TABLE_Y=1000, _TABLE_Z=0
N80 DEF REAL WING_X,WING_Y,WING_Z,WING_X_OUT,WING_Y_OUT,WING_Z_OUT
N90 DEF REAL _VYSL1, _VYSL2, _VYSL3, _TEMP
N100 DEF INT _BIN_KOM_2_IN, _BIN_KOM_2_OUT
N110 DEF REAL _C800_ROT_A, _C800_ROT_B, _C800_ROT_C
N120 DEF REAL _HLAVA_CM, _HLAVA_AM, _KONTR1, _KONTR2
N130 DEF INT _POLE_I, _POLE_J, _POLE_K, _CITAC, _LEIBNITZ_DET, _LEIBNITZ_ATAN
```

```
;
```

```
;
```

```
;MAIN PROGRAM
```

```
;
```

```
N140 IF ((_ROT_NEW_ADI==1)AND(_CYCLE600_KONT<>6))
N150 MSG("!!! THE PREVIOUS CALL OF CYCLE600 WASN'T COMPLETED !!!")
N160 GOTOF CHYBA
N170 ENDIF
N180 _CYCLE600_KONT=1
N190 IF
NOT((_BIN_KOM_10_INPUT==27)OR(_BIN_KOM_10_INPUT==30)OR(_BIN_KOM_10_INPUT==39)OR(_BIN_KOM
_10_INPUT==45)OR(_BIN_KOM_10_INPUT==54)OR(_BIN_KOM_10_INPUT==57))
N200 MSG("!!! WRONG INPUT PARAMETER "<<_BIN_KOM_10_INPUT<<" !!!")
N210 GOTOF CHYBA
N220 ENDIF
N230 IF
NOT((_BIN_KOM_10_OUTPUT==27)OR(_BIN_KOM_10_OUTPUT==30)OR(_BIN_KOM_10_OUTPUT==39)OR(_BIN
_KOM_10_OUTPUT==45)OR(_BIN_KOM_10_OUTPUT==54)OR(_BIN_KOM_10_OUTPUT==57))
N240 MSG("!!! WRONG INPUT PARAMETER "<<_BIN_KOM_10_OUTPUT<<" !!!")
N250 GOTOF CHYBA
N260 ENDIF
N270 HEAD_DEF(_HLAVA)
N280 STOPRE
N290 IF WING_X1>180
N300 WING_X1=WING_X1-360
N310 ENDIF
N320 IF WING_X1<-180
N330 WING_X1=WING_X1+360
N340 ENDIF
N350 IF WING_Y1>90
N360 WING_Y1=WING_Y1-180
N370 ENDIF
N380 IF WING_Y1<-90
N390 WING_Y1=WING_Y1+180
```



```
N400 ENDIF
N410 IF WING_Z1>180
N420 WING_Z1=WING_Z1-360
N430 ENDIF
N440 IF WING_Z1<-180
N450 WING_Z1=WING_Z1+360
N460 ENDIF
N470 STOPRE
N480 PREVOD_10_2_VSTUPNI_MATICE:
N490 _VYSL1=_BIN_KOM_10_INPUT
N500 _CITAC=1
N510 STOPRE
N520 REPEAT
N530 _VYSL3=_VYSL1 MOD 2
N540 _VYSL1=_VYSL1 DIV 2
N550 _VYSL2=_VYSL2+_VYSL3*_CITAC
N560 _CITAC=_CITAC*10
N570 STOPRE
N580 UNTIL _VYSL1<=0
N590 IF _C800_OR_ROT_INPUT==0
N600 _BIN_KOM_2_IN=_VYSL2
N610 ELSE
N620 _BIN_KOM_2_IN=0 _CITAC=1 _VYSL1=10000 _VYSL3=0
N630 STOPRE
N640 REPEAT
N650 _VYSL3=_VYSL2 MOD 100
N660 IF _CITAC==4
N670 _BIN_KOM_2_IN=_VYSL3
N680 ELSE
N690 _BIN_KOM_2_IN=_BIN_KOM_2_IN+(_VYSL3*_VYSL1)
N700 ENDIF
N710 STOPRE
N720 _CITAC=_CITAC+1 _VYSL1=_VYSL1/100
N730 _VYSL2=_VYSL2 DIV 100
N740 UNTIL _CITAC==4
N750 ENDIF
N760 STOPRE
N770 _VYSL3=0 _VYSL1=0 _VYSL2=0 _CITAC=0
N780 STOPRE
N790 PREVOD_10_2_VYSTUPNI_MATICE:
N800 _VYSL1=_BIN_KOM_10_OUTPUT
N810 _CITAC=1
N820 STOPRE
N830 REPEAT
N840 _VYSL3=_VYSL1 MOD 2
N850 _VYSL1=_VYSL1 DIV 2
N860 _VYSL2=_VYSL2+_VYSL3*_CITAC
N870 _CITAC=_CITAC*10
N880 STOPRE
N890 UNTIL _VYSL1<=0
N900 IF _C800_OR_ROT_OUTPUT==0
N910 _BIN_KOM_2_OUT=_VYSL2
N920 ELSE
N930 _BIN_KOM_2_OUT=0 _CITAC=1 _VYSL1=10000 _VYSL3=0
N940 STOPRE
```

```
N950 REPEAT
N960   _VYSL3=_VYSL2 MOD 100
N970   IF _CITAC==4
N980     _BIN_KOM_2_OUT=_VYSL3
N990     ELSE
N1000    _BIN_KOM_2_OUT=_BIN_KOM_2_OUT+(_VYSL3*_VYSL1)
N1010    ENDIF
N1020    STOPRE
N1030    _CITAC=_CITAC+1 _VYSL1=_VYSL1/100
N1040    _VYSL2=_VYSL2 DIV 100
N1050    UNTIL _CITAC==4
N1060  ENDIF
N1070 STOPRE
N1080 _CITAC=0
N1090 NACTENI_PORADI_VSTUPNI_MATICE:
N1100 REPEAT
N1110   _VYSL1=_BIN_KOM_2_IN MOD 100
N1120   CASE _VYSL1 OF 01 GOTOF _BIN_KOM_X 10 GOTOF _BIN_KOM_Y 11 GOTOF _BIN_KOM_Z
N1130   _BIN_KOM_X:
N1140     _MAT_PORADI_IN[_CITAC]="X"
N1150     GOTOF _BIN_KOM_END
N1160   _BIN_KOM_Y:
N1170     _MAT_PORADI_IN[_CITAC]="Y"
N1180     GOTOF _BIN_KOM_END
N1190   _BIN_KOM_Z:
N1200     _MAT_PORADI_IN[_CITAC]="Z"
N1210     GOTOF _BIN_KOM_END
N1220   _BIN_KOM_END:
N1230     _BIN_KOM_2_IN=_BIN_KOM_2_IN DIV 100
N1240     STOPRE
N1250     _CITAC=_CITAC+1
N1260   UNTIL _CITAC>=3
N1270   _CITAC=0 _VYSL1=0 _VYSL2=0 _VYSL3=0
N1280   STOPRE
N1290 NACTENI_UHLU_VSTUPNI_MATICE:
N1300   CASE _MAT_PORADI_IN[0] OF 88 GOTOF UHEL1_X_IN 89 GOTOF UHEL1_Y_IN 90 GOTOF UHEL1_Z_IN
N1310   UHEL1_X_IN:
N1320     WING_X=WING_X1 _MAT_VZOREC_IN[0]=1
N1330     GOTOF KON_MAT1_IN
N1340   UHEL1_Y_IN:
N1350     WING_Y=WING_X1 _MAT_VZOREC_IN[0]=2
N1360     GOTOF KON_MAT1_IN
N1370   UHEL1_Z_IN:
N1380     WING_Z=WING_X1 _MAT_VZOREC_IN[0]=3
N1390     GOTOF KON_MAT1_IN
N1400   KON_MAT1_IN:
N1410   STOPRE
N1420   CASE _MAT_PORADI_IN[1] OF 88 GOTOF UHEL2_X_IN 89 GOTOF UHEL2_Y_IN 90 GOTOF
UHEL2_Z_IN
N1430   UHEL2_X_IN:
N1440     WING_X=WING_Y1 _MAT_VZOREC_IN[1]=1
N1450     GOTOF KON_MAT2_IN
N1460   UHEL2_Y_IN:
N1470     WING_Y=WING_Y1 _MAT_VZOREC_IN[1]=2
N1480     GOTOF KON_MAT2_IN
```

```
N1490      UHEL2_Z_IN:
N1500      WING_Z=WING_Y1 _MAT_VZOREC_IN[1]=3
N1510      GOTOF KON_MAT2_IN
N1520      KON_MAT2_IN:
N1530      STOPRE
N1540      CASE _MAT_PORADI_IN[2] OF 88 GOTOF UHEL3_X_IN 89 GOTOF UHEL3_Y_IN 90 GOTOF
UHEL3_Z_IN
N1550      UHEL3_X_IN:
N1560      WING_X=WING_Z1 _MAT_VZOREC_IN[2]=1
N1570      GOTOF KON_MAT3_IN
N1580      UHEL3_Y_IN:
N1590      WING_Y=WING_Z1 _MAT_VZOREC_IN[2]=2
N1600      GOTOF KON_MAT3_IN
N1610      UHEL3_Z_IN:
N1620      WING_Z=WING_Z1 _MAT_VZOREC_IN[2]=3
N1630      GOTOF KON_MAT3_IN
N1640      KON_MAT3_IN:
N1650      STOPRE
N1660      NACTENI_PORADI_VYSTUPNI_MATICE:
N1670      REPEAT
N1680      _VYSL1=_BIN_KOM_2_OUT MOD 100
N1690      CASE _VYSL1 OF 01 GOTOF _BIN_KOM_X_OUT 10 GOTOF _BIN_KOM_Y_OUT 11 GOTOF
_BIN_KOM_Z_OUT
N1700      _BIN_KOM_X_OUT:
N1710      _MAT_PORADI_OUT[_CITAC]="X"
N1720      GOTOF _BIN_KOM_END_OUT
N1730      _BIN_KOM_Y_OUT:
N1740      _MAT_PORADI_OUT[_CITAC]="Y"
N1750      GOTOF _BIN_KOM_END_OUT
N1760      _BIN_KOM_Z_OUT:
N1770      _MAT_PORADI_OUT[_CITAC]="Z"
N1780      GOTOF _BIN_KOM_END_OUT
N1790      _BIN_KOM_END_OUT:
N1800      _BIN_KOM_2_OUT=_BIN_KOM_2_OUT DIV 100
N1810      STOPRE
N1820      _CITAC=_CITAC+1
N1830      UNTIL _CITAC>=3
N1840      _CITAC=0 _VYSL1=0 _VYSL2=0 _VYSL3=0
N1850      STOPRE
N1860      NACTENI_LEIBNITZ_VZORCU_VYSTUPNI_MATICE:
N1870      IF _C800_OR_ROT_OUTPUT==1
N1880      _VYSL1=_MAT_PORADI_OUT[0] _VYSL2=_MAT_PORADI_OUT[2]
N1890      _MAT_PORADI_OUT[0]=_VYSL2 _MAT_PORADI_OUT[2]=_VYSL1
N1900      _VYSL1=0 _VYSL2=0
N1910      ENDIF
N1920      CASE _MAT_PORADI_OUT[0] OF 88 GOTOF UHEL1_X_OUT 89 GOTOF UHEL1_Y_OUT 90 GOTOF
UHEL1_Z_OUT
N1930      UHEL1_X_OUT:
N1940      _MAT_LEIBNITZ[0,0]=1 _MAT_LEIBNITZ[0,1]=0 _MAT_LEIBNITZ[0,2]=0 _MAT_VZOREC_OUT[0]=1
N1950      GOTOF KON_MAT1_OUT
N1960      UHEL1_Y_OUT:
N1970      _MAT_LEIBNITZ[0,0]=0 _MAT_LEIBNITZ[0,1]=1 _MAT_LEIBNITZ[0,2]=0 _MAT_VZOREC_OUT[0]=2
N1980      GOTOF KON_MAT1_OUT
N1990      UHEL1_Z_OUT:
N2000      _MAT_LEIBNITZ[0,0]=0 _MAT_LEIBNITZ[0,1]=0 _MAT_LEIBNITZ[0,2]=1 _MAT_VZOREC_OUT[0]=3
```

```
N2010     GOTOF KON_MAT1_OUT
N2020     KON_MAT1_OUT:
N2030     STOPRE
N2040     CASE _MAT_PORADI_OUT[1] OF 88 GOTOF UHEL2_X_OUT 89 GOTOF UHEL2_Y_OUT 90 GOTOF
UHEL2_Z_OUT
N2050     UHEL2_X_OUT:
N2060     _MAT_LEIBNITZ[1,0]=1 _MAT_LEIBNITZ[1,1]=0 _MAT_LEIBNITZ[1,2]=0 _MAT_VZOREC_OUT[1]=1
N2070     GOTOF KON_MAT2_OUT
N2080     UHEL2_Y_OUT:
N2090     _MAT_LEIBNITZ[1,0]=0 _MAT_LEIBNITZ[1,1]=1 _MAT_LEIBNITZ[1,2]=0 _MAT_VZOREC_OUT[1]=2
N2100     GOTOF KON_MAT2_OUT
N2110     UHEL2_Z_OUT:
N2120     _MAT_LEIBNITZ[1,0]=0 _MAT_LEIBNITZ[1,1]=0 _MAT_LEIBNITZ[1,2]=1 _MAT_VZOREC_OUT[1]=3
N2130     GOTOF KON_MAT2_OUT
N2140     KON_MAT2_OUT:
N2150     STOPRE
N2160     CASE _MAT_PORADI_OUT[2] OF 88 GOTOF UHEL3_X_OUT 89 GOTOF UHEL3_Y_OUT 90 GOTOF
UHEL3_Z_OUT
N2170     UHEL3_X_OUT:
N2180     _MAT_LEIBNITZ[2,0]=1 _MAT_LEIBNITZ[2,1]=0 _MAT_LEIBNITZ[2,2]=0 _MAT_VZOREC_OUT[2]=1
N2190     GOTOF KON_MAT3_OUT
N2200     UHEL3_Y_OUT:
N2210     _MAT_LEIBNITZ[2,0]=0 _MAT_LEIBNITZ[2,1]=1 _MAT_LEIBNITZ[2,2]=0 _MAT_VZOREC_OUT[2]=2
N2220     GOTOF KON_MAT3_OUT
N2230     UHEL3_Z_OUT:
N2240     _MAT_LEIBNITZ[2,0]=0 _MAT_LEIBNITZ[2,1]=0 _MAT_LEIBNITZ[2,2]=1 _MAT_VZOREC_OUT[2]=3
N2250     GOTOF KON_MAT3_OUT
N2260     KON_MAT3_OUT:
N2270     IF _C800_OR_ROT_OUTPUT==1
N2280     _VYSL1=_MAT_PORADI_OUT[0] _VYSL2=_MAT_PORADI_OUT[2]
N2290     _MAT_PORADI_OUT[0]=_VYSL2 _MAT_PORADI_OUT[2]=_VYSL1
N2300     _VYSL1=0 _VYSL2=0
N2310     ENDIF
N2320     STOPRE
N2330     NACTENI_MATIC:
N2340     _TILT_TABLE[0,0]=SET(1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,_TABLE_X,_TABLE_Y,_TABLE_Z,1)
N2350     _MAT_VVEKTOR[0,0]=SET(1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,_POS_X,_POS_Y,_POS_Z,1)
N2360     _MAT_ROT_X[0,0]=SET(1,0,0,0,0,COS(WING_X),SIN(WING_X),0,0,-
SIN(WING_X),COS(WING_X),0,0,0,0,1)
N2370     _MAT_ROT_Y[0,0]=SET(COS(WING_Y),-SIN(WING_Y),0,0,1,0,0,SIN(WING_Y),0,COS(WING_Y),0,0,0,0,1)
N2380     _MAT_ROT_Z[0,0]=SET(COS(WING_Z),SIN(WING_Z),0,0,-SIN(WING_Z),COS(WING_Z),0,0,0,0,1,0,0,0,0,1)
N2390     _MAT_VVYS[0,0]=SET(1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1)
N2400     _MAT_C800[0,0]=SET(1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1)
n2410     STOPRE
N2420     POSUN_DO_STREDU_OTACENI:
N2430     FOR _POLE_I=0 TO 3
N2440     FOR _POLE_J=0 TO 3
N2450     _MAT_POM[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_VVEKTOR[_POLE_I,_POLE_J]
N2460     ENDFOR
N2470     ENDFOR
N2480     STOPRE
N2490     ROTACE1:
N2500     CASE _MAT_PORADI_IN[0] OF 88 GOTOF _NAPLN_X 89 GOTOF _NAPLN_Y 90 GOTOF _NAPLN_Z
N2510     _NAPLN_X:
N2520     FOR _POLE_I=0 TO 3
```

```
N2530   FOR _POLE_J=0 TO 3
N2540   _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_X[_POLE_I,_POLE_J]
N2550   ENDFOR
N2560   ENDFOR
N2570   STOPRE
N2580   GOTOF _NAPLN_END
N2590   _NAPLN_Y:
N2600   FOR _POLE_I=0 TO 3
N2610   FOR _POLE_J=0 TO 3
N2620   _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_Y[_POLE_I,_POLE_J]
N2630   ENDFOR
N2640   ENDFOR
N2650   STOPRE
N2660   GOTOF _NAPLN_END
N2670   _NAPLN_Z:
N2680   FOR _POLE_I=0 TO 3
N2690   FOR _POLE_J=0 TO 3
N2700   _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_Z[_POLE_I,_POLE_J]
N2710   ENDFOR
N2720   ENDFOR
N2730   STOPRE
N2740   GOTOF _NAPLN_END
N2750   _NAPLN_END:
N2760   FOR _POLE_I=0 TO 3
N2770   FOR _POLE_J=0 TO 3
N2780   _VYSL1=0 _VYSL2=0
N2790   STOPRE
N2800   FOR _CITAC=0 TO 3
N2810   _VYSL1=_MAT_AKT[_CITAC,_POLE_I]*_MAT_POM[_POLE_J,_CITAC]
N2820   STOPRE
N2830   _VYSL2=_VYSL1+_VYSL2
N2840   ENDFOR
N2850   STOPRE
N2860   _MAT_VYS[_POLE_J,_POLE_I]=_VYSL2
N2870   _CITAC=0 _VYSL1=0 _VYSL2=0
N2880   ENDFOR
N2890   ENDFOR
N2900   STOPRE
N2910   FOR _POLE_I=0 TO 3
N2920   FOR _POLE_J=0 TO 3
N2930   _MAT_POM[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_VYS[_POLE_I,_POLE_J]
N2940   ENDFOR
N2950   ENDFOR
N2960   STOPRE
N2970   FOR _POLE_I=0 TO 3
N2980   FOR _POLE_J=0 TO 3
N2990   _MAT_VYS[_POLE_I,_POLE_J]=0
N3000   ENDFOR
N3010   ENDFOR
N3020   STOPRE
N3030   ROTACE2:
N3040   CASE _MAT_PORADI_IN[1] OF 88 GOTOF _NAPLN_X 89 GOTOF _NAPLN_Y 90 GOTOF _NAPLN_Z
N3050   _NAPLN_X:
N3060   FOR _POLE_I=0 TO 3
N3070   FOR _POLE_J=0 TO 3
```

```
N3080  _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_X[_POLE_I,_POLE_J]
N3090  ENDFOR
N3100  ENDFOR
N3110  STOPRE
N3120  GOTOF _NAPLN_END
N3130  _NAPLN_Y:
N3140  FOR _POLE_I=0 TO 3
N3150  FOR _POLE_J=0 TO 3
N3160  _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_Y[_POLE_I,_POLE_J]
N3170  ENDFOR
N3180  ENDFOR
N3190  STOPRE
N3200  GOTOF _NAPLN_END
N3210  _NAPLN_Z:
N3220  FOR _POLE_I=0 TO 3
N3230  FOR _POLE_J=0 TO 3
N3240  _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_Z[_POLE_I,_POLE_J]
N3250  ENDFOR
N3260  ENDFOR
N3270  STOPRE
N3280  GOTOF _NAPLN_END
N3290  _NAPLN_END:
N3300  FOR _POLE_I=0 TO 3
N3310  FOR _POLE_J=0 TO 3
N3320  _VYSL1=0 _VYSL2=0
N3330  STOPRE
N3340  FOR _CITAC=0 TO 3
N3350  _VYSL1=_MAT_AKT[_CITAC,_POLE_I]*_MAT_POM[_POLE_J,_CITAC]
N3360  STOPRE
N3370  _VYSL2=_VYSL1+_VYSL2
N3380  ENDFOR
N3390  STOPRE
N3400  _MAT_VYS[_POLE_J,_POLE_I]=_VYSL2
N3410  _CITAC=0 _VYSL1=0 _VYSL2=0
N3420  ENDFOR
N3430  ENDFOR
N3440  STOPRE
N3450  FOR _POLE_I=0 TO 3
N3460  FOR _POLE_J=0 TO 3
N3470  _MAT_POM[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_VYS[_POLE_I,_POLE_J]
N3480  ENDFOR
N3490  ENDFOR
N3500  STOPRE
N3510  FOR _POLE_I=0 TO 3
N3520  FOR _POLE_J=0 TO 3
N3530  _MAT_VYS[_POLE_I,_POLE_J]=0
N3540  ENDFOR
N3550  ENDFOR
N3560  STOPRE
N3570  ROTACE3:
N3580  CASE _MAT_PORADI_IN[2] OF 88 GOTOF _NAPLN_X 89 GOTOF _NAPLN_Y 90 GOTOF _NAPLN_Z
N3590  _NAPLN_X:
N3600  FOR _POLE_I=0 TO 3
N3610  FOR _POLE_J=0 TO 3
N3620  _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_X[_POLE_I,_POLE_J]
```

```
N3630   ENDFOR
N3640   ENDFOR
N3650   STOPRE
N3660   GOTOF _NAPLN_END
N3670   _NAPLN_Y:
N3680   FOR _POLE_I=0 TO 3
N3690   FOR _POLE_J=0 TO 3
N3700   _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_Y[_POLE_I,_POLE_J]
N3710   ENDFOR
N3720   ENDFOR
N3730   STOPRE
N3740   GOTOF _NAPLN_END
N3750   _NAPLN_Z:
N3760   FOR _POLE_I=0 TO 3
N3770   FOR _POLE_J=0 TO 3
N3780   _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_ROT_Z[_POLE_I,_POLE_J]
N3790   ENDFOR
N3800   ENDFOR
N3810   STOPRE
N3820   GOTOF _NAPLN_END
N3830   _NAPLN_END:
N3840   FOR _POLE_I=0 TO 3
N3850   FOR _POLE_J=0 TO 3
N3860   _VYSL1=0 _VYSL2=0
N3870   STOPRE
N3880   FOR _CITAC=0 TO 3
N3890   _VYSL1=_MAT_AKT[_CITAC,_POLE_I]*_MAT_POM[_POLE_J,_CITAC]
N3900   STOPRE
N3910   _VYSL2=_VYSL1+_VYSL2
N3920   ENDFOR
N3930   STOPRE
N3940   _MAT_VYS[_POLE_J,_POLE_I]=_VYSL2
N3950   _CITAC=0 _VYSL1=0 _VYSL2=0
N3960   ENDFOR
N3970   STOPRE
N3980   ENDFOR
N3990   FOR _POLE_I=0 TO 3
N4000   FOR _POLE_J=0 TO 3
N4010   _MAT_POM[_POLE_I,_POLE_J]=0 _MAT_AKT[_POLE_I,_POLE_J]=0
N4020   ENDFOR
N4030   ENDFOR
N4040   STOPRE
N4050   PRIDAVNA_ROTACE:
N4060   FOR _POLE_I=0 TO 3
N4070   FOR _POLE_J=0 TO 3
N4080   _MAT_POM[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_VYS[_POLE_I,_POLE_J]
N4090   ENDFOR
N4100   ENDFOR
N4110   IF _ROT_NEW_ADI==1
N4120   FOR _POLE_I=0 TO 3
N4130   FOR _POLE_J=0 TO 3
N4140   _VYSL1=0 _VYSL2=0
N4150   STOPRE
N4160   FOR _CITAC=0 TO 3
N4170   IF _C800_OR_ROT_INPUT==1
```

```
N4180     _VYSL1=_MAT_VYS_ADD[_POLE_I,_CITAC]*_MAT_POM[_CITAC,_POLE_J]
N4190     ELSE
N4200     _VYSL1=_MAT_POM[_CITAC,_POLE_I]*_MAT_VYS_ADD[_POLE_J,_CITAC]
N4210     ENDIF
N4220     STOPRE
N4230     _VYSL2=_VYSL1+_VYSL2
N4240     ENDFOR
N4250     STOPRE
N4260     _MAT_VYS[_POLE_J,_POLE_I]=_VYSL2
N4270     _CITAC=0 _VYSL1=0 _VYSL2=0
N4280     ENDFOR
N4290     STOPRE
N4300     ENDFOR
N4310     ENDIF
N4320     STOPRE
N4330     _CYCLE600_KONT=5
N4340     VYPOCET_DETERMINANTU_LEIBNITZ_MATICE:
N4350
    _LEIBNITZ_DET=((_MAT_LEIBNITZ[0,0]*_MAT_LEIBNITZ[1,1]*_MAT_LEIBNITZ[2,2]+_MAT_LEIBNITZ[0,1]*_MAT_
    LEIBNITZ[1,2]*_MAT_LEIBNITZ[2,0]+_MAT_LEIBNITZ[0,2]*_MAT_LEIBNITZ[1,0]*_MAT_LEIBNITZ[2,1])-
    (_MAT_LEIBNITZ[0,2]*_MAT_LEIBNITZ[1,1]*_MAT_LEIBNITZ[2,0]+_MAT_LEIBNITZ[0,0]*_MAT_LEIBNITZ[1,2]*_
    MAT_LEIBNITZ[2,1]+_MAT_LEIBNITZ[0,1]*_MAT_LEIBNITZ[1,0]*_MAT_LEIBNITZ[2,2]))
N4360     STOPRE
N4370     VYPOCET_UHLU_VYSTUPNI_ROTACE:
N4380     IF _C800_OR_ROT_OUTPUT<>0
N4390     _VYSL1=_MAT_VZOREC_OUT[0] _VYSL2=_MAT_VZOREC_OUT[1] _VYSL3=_MAT_VZOREC_OUT[2]
N4400     ELSE
N4410     _VYSL3=_MAT_VZOREC_OUT[0] _VYSL2=_MAT_VZOREC_OUT[1] _VYSL1=_MAT_VZOREC_OUT[2]
    _LEIBNITZ_DET=-_LEIBNITZ_DET
N4420     ENDIF
N4430     STOPRE
N4440     _VYSL1=_VYSL1-1 _VYSL2=_VYSL2-1 _VYSL3=_VYSL3-1
N4450     _LEIBNITZ_ATAN=-_LEIBNITZ_DET
N4460     STOPRE
N4470     _C800_ROT_A=((ATAN2(_MAT_VYS[_VYSL2,_VYSL1],_MAT_VYS[_VYSL1,_VYSL1]))*(LEIBNITZ_ATAN))
N4480     _C800_ROT_B=((ASIN(_MAT_VYS[_VYSL3,_VYSL1]))*(LEIBNITZ_DET))
N4490     _C800_ROT_C=((ATAN2(_MAT_VYS[_VYSL3,_VYSL2],_MAT_VYS[_VYSL3,_VYSL3]))*(LEIBNITZ_ATAN))
N4500     STOPRE
N4510     IF _C800_OR_ROT_OUTPUT<>0
N4520     _VYSL1=_C800_ROT_A _VYSL2=_C800_ROT_C
N4530     _C800_ROT_A=_VYSL2 _C800_ROT_C=_VYSL1
N4540     ENDIF
N4550     STOPRE
N4560     _NATOCENI_OS:
N4570
    _KONTR2=SQRT((_MAT_VYS[2,0]*_MAT_VYS[2,0])+(_MAT_VYS[2,1]*_MAT_VYS[2,1])+(_MAT_VYS[2,2]*_MAT_V
    YS[2,2]))
N4580     STOPRE
N4590     _HLAVA_AM=-ACOS(_MAT_VYS[2,2]/_KONTR2)
N4600     IF NOT((_MAT_VYS[2,0]==0)AND(_MAT_VYS[2,1]==0))
N4610     _HLAVA_CM=-ATAN2(_MAT_VYS[2,0],_MAT_VYS[2,1])
N4620     ENDIF
N4630     STOPRE
N4640     IF _SWING_OR_RECALCULATE==1
N4650     _VYSL1=110000
```



```
N4660 ELSE
N4670   _VYSL1=1100000
N4680 ENDIF
N4690 IF _ROT_NEW_ADI==1
N4700   _VYSL1=_VYSL1+1
N4710 ENDIF
N4720 IF _RETRACT_PRIOR_ROTATION==1
N4730   _VYSL2=1
N4740 ELSE
N4750   _VYSL2=0
N4760 ENDIF
N4770 GOTO END
N4780 CHYBA:
N4790 REPEAT
N4800 MO
N4810 UNTIL TRUE AND FALSE
;-----

;-----
;END
;-----

N4820 END:
N4830 FOR _POLE_I=0 TO 3
N4840   FOR _POLE_J=0 TO 3
N4850     _MAT_VYS_ADD[_POLE_I,_POLE_J]=_MAT_VYS[_POLE_I,_POLE_J]
N4860   ENDFOR
N4870 ENDFOR
N4880
CYCLE800(_VYSL2,_HLAVA,_VYSL1,_BIN_KOM_10_OUTPUT,_POS_X,_POS_Y,_POS_Z,_C800_ROT_A,_C800_ROT_
B,_C800_ROT_C,_POS_X_NAT,_POS_Y_NAT,_POS_Z_NAT,_ROTACE_INVERZ,100,1)
N4890 MO
N4900 STOPRE
N4910   _CYCLE600_KONT=6
N4920 MSG()
N4930 M17
```

PŘÍLOHA č.4

Cyklus pro měření neúplného kruhu IOV_SEGMENT

```
N10 PROC IOV_SEGMENT (REAL _DISKD, INT _KDOVOLA) SAVE; DISPLOF
; $PATH=/_N_CMA_DIR
;%_N_IOV_SEGMENT_SPF

;VERSION: A_20110411 LEH

;-----
;HCW 3-250Nc + IOV350, Ob25107 + Ob25108, ALSTOM1, USA
;ZAK. C.: 391-812-6569
;CYCLE PRO MERENI NULOVEHO BODU SEGMENTU V OSE YM
;-----

;-----
;_DISKD - PRUMER DISKU NA ROTORU
;_KDOVOLA - VOLANI CYKLU: 1 - STANDARDNI VOLANI -1- VOLANI Z CYKLU SMT
;-----

;-----
N20 DEF REAL _POJEZD, _ZMO, _POMO1, _POMO2, _POMO3
N30 DEF INT _CITAC, _HLASENI, _FG70, _FG90, _FWAL
;-----

;-----
;PODMINKY
;-----
N40 IF _KDOVOLA<>((1)OR(-1))
N50 _HLASENI=4
N60 GOTOF CHYBA
N70 ENDIF
N80 IF _KDOVOLA==1
N90 IF HLAVA<>31
N100 _HLASENI=3
N110 GOTOF CHYBA
N120 ENDIF
N130 ENDIF
N140 IF (_DISKD<200) OR (_DISKD>5000)
N150 _HLASENI=4
N160 GOTOF CHYBA
N170 ENDIF

N180 WHILE $P_DRYRUN
N190 _HLASENI=1
N200 GOTOF CHYBA
N210 ENDWHILE
N220 IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_IOV_ACT_POS_SPF"))
N230 INIT(3,"/_N_CMA_DIR/_N_IOV_ACT_POS_SPF")
N240 ELSE
N250 _HLASENI=2
N260 GOTOF CHYBA
N270 ENDIF
N280 IF (ISFILE("/_N_CMA_DIR/_N_P_WORK_SPF"))
N290 P_WORK
```

```
N300 ELSE
N310   _HLASENI=5
N320   GOTOF CHYBA
N330 ENDIF
N340 GOTOF NASTAVENI
;-----

;-----
;NASTAVENI
;-----

N350 NASTAVENI:
N360   IF _KDOVOLA==1
N370     M5 M9 M41
N380     T="PROBE"
N390     M6
N400     MSG("DO YOU WANT TO MEASURE IN THIS POSITION?")
N410     M0
N420     IF R250<>131
N430       MSG("TO GET BEST RESULTS, CALIBRATE THE PROBE")
N440       M0
N450     ENDIF
N460     R100=$P_GG[8] _FG70=$P_GG[13] _FG90=$P_GG[14] _FWAL=$P_GG[28]
N470     G710 G90 G94
N480     CYCLE800()
N490     TRAFOOF
N500     MCALL
N510     DRFOF
N520     GEOAX()
N530     IF R100<>99
N540       G598 D0
N550       MSG("!!! WORK OFFSET G598 IS ACTIVE NOW !!!")
N560       G4 F5
N570     ENDIF
N580   ENDIF
N111   DO
N590     _YMO=1213.722 _ZMO=-(2130.148+_Z11I)
N600     R92=$AA_IM[X] R20=$P_UIFR[98,X,0] R21=$P_UIFR[98,Y,0] R22=$P_UIFR[98,Z,0]
R23=$P_UIFR[98,W,0]
N610     R24=$P_UIFR[98,X,FI] R25=$P_UIFR[98,Y,FI] R26=$P_UIFR[98,Z,FI] R27=$P_UIFR[98,W,FI]
N620     $P_UIFR[98,X,FI]=0 $P_UIFR[98,Y,FI]=0 $P_UIFR[98,Z,FI]=0 $P_UIFR[98,W,FI]=0
N630     $P_UIFR[98]=CTTRANS(X, R92 ,Y, _YMO ,Z, _ZMO ,W,0)
N640     G598 D1
N650     IF _KDOVOLA==1
N660       MSG("MEASURING OF THE YM ZERO POINT IN PROCESS")
N670       GO D0 SUPA Z0 W0 SPOS=0
N680       GO SUPA Y=_YMO
N690     ENDIF
N700     STOPRE
N710     GOTOF VaM
;-----

;-----
;VYPOCET A MERENI - VaM
```

```
;-----  
N720 VaM:  
N730 _POJEZD=SQRT(POT(_DISKD/2)-POT((_DISKD/2)-80))  
N740 G1 D1 F5000 Y=_POJEZD+50  
N750 RENW_ON  
N760 MEAS=1 G1 D1 Z=( _DISKD/2)+300 F5000  
N770 IF $AC_MEA[1]==1  
N780 _HLASENI=6  
N790 G[8]=R100  
N800 GOTOF CHYBA  
N810 ENDIF  
N820 MEAS=1 Z=( _DISKD/2)-80 F1000  
N830 IF $AC_MEA[1]==1  
N840 _HLASENI=6  
N850 G[8]=R100  
N860 GOTOF CHYBA  
N870 ENDIF  
N880 RENW_OF  
N890 _MVAR=104 _SETVAL=_POJEZD*2 _ID=130  
N900 _CPA=0 _CPO=0 _STA1=90  
N910 _PRNUM=102 _KNUM=98  
;N10 _TUL=0.1 _TLL=-0.1 _EVNUM=0  
;N10 _K=1 _TZL=0.01 _TMV=0.05 _TDIF=0.2  
N920 _TSA=3  
N930 _VMS=0 _NMSP=1 _FA=10  
N940 CYCLE979  
N950 IF _KDOVOLA==1  
N960 GOTOF END  
N970 ELSE  
N980 M17  
N990 ENDIF  
;-----  
  
;-----  
;CHYBA  
;-----  
N1000 CHYBA:  
N1111 RENW_OF  
N1010 MSG()  
N1020 CASE _HLASENI OF 1 GOTOF AAA1 2 GOTOF AAA2 3 GOTOF AAA3 4 GOTOF AAA4 5 GOTOF AAA5 6  
GOTOF AAA6;DEFAULT DAL  
N1030 AAA1:  
N1040 MSG(" CANCEL DRYRUN")  
N1050 GOTOF DAL  
N1060 AAA2:  
N1070 MSG(" SUBPROGRAM IOV_ACT_POS.SPF IS UNLOADED")  
N1080 GOTOF DAL  
N1090 AAA3:  
N1100 MSG(" COVER PLATE IS NOT LOADED ON RAM ")  
N1110 GOTOF DAL  
N1120 AAA4:  
N1130 MSG(" WRONG CYCLE PARAMETRS")  
N1140 GOTOF DAL  
N1150 AAA5:
```

```
N1160 MSG(" SUBPROGRAM P_WORK.SPF IS UNLOADED")
N1170 GOTOF DAL
N1180 AAA6:
N1190 MSG("!!! PROBE COLISION !!!")
N1200 GOTOF DAL
N1210 DAL:
N1230 REPEAT
N1240 MO
N1250 UNTIL TRUE AND FALSE
;-----

;-----
;END
;-----
N1260 END:
N1270 GO D0 SUPA Z0
N1280 GO D1 Y0 SPOS=0
N1300 IF R100<>1
N1310 _POMO1=$P_UIFR[98,Y,FI] _POMO2=$P_UIFR[98,Y,0]
N1320 STOPRE
N1330 _POMO3=_POMO1+_POMO2
N1340 STOPRE
N1350 _POMO1=$P_UIFR[(R100-1),Y,FI] _POMO2=$P_UIFR[(R100-1),Y,0]
N1360 STOPRE
N1370 _POMO1=_POMO1+_POMO2
N1380 STOPRE
N1390 _POMO3=( _POMO3)-( _POMO1)+($P_UIFR[(R100-1),Y,FI])
N1400 STOPRE
N1410 $P_UIFR[(R100-1),Y,FI]=_POMO3
N1420 STOPRE
N1430 $P_UIFR[98]=CTTRANS(X,R20,Y,R21,Z,R22,W,R23)
N1440 STOPRE
N1450 $P_UIFR[98,X,FI]=R24 $P_UIFR[98,Y,FI]=R25 $P_UIFR[98,Z,FI]=R26 $P_UIFR[98,W,FI]=R27
N1460 R20=0 R21=0 R22=0 R23=0 R24=0 R25=0 R26=0 R27=0
N1470 IF _FWAL==1
N1480 WALIMON
N1490 ELSE
N1500 WALIMOF
N1510 ENDIF
N1520 ENDIF
N1530 CASE _FG70 OF 1 GOTOF LG70 2 GOTOF LG71 3 GOTOF LG700 4 GOTOF LG710
N1540 LG70:
N1550 G70
N1560 GOTOF CONT
N1570 LG71:
N1580 G71
N1590 GOTOF CONT
N1600 LG700:
N1610 G700
N1620 GOTOF CONT
N1630 LG710:
N1640 G710
N1650 CONT:
```

```
N1660 IF _FG90==1
N1670     G90
N1680     ELSE
N1690     G91
N1700 ENDIF
N1710 G[8]=R100
N1720 R199=0
N1730 IF R100<>99
N1740     FOR _CITAC=1 TO R100
N1750         IF ((R100>=2) AND (R100<=5))
N1760             R199=52+_CITAC
N1770         ELSE
N1780             R199=499+_CITAC
N1790         ENDIF
N1800     ENDFOR
N1810     MSG("!!! WORK OFFSET G"<<R199<<" IS ACTIVE NOW !!!")
N1820     G4 F5
N1830 ENDIF
N1840 MSG()
N1850 M17
```