

Vyhodnocení dat z dotykového víceparametrického měření ve strojírenské výrobě

Michal Kuchař*¹

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Práce se zabývá vyhodnocením a matematickým zpracováním dat z měřicí hlavičky firmy Amest s.r.o. Tato hlavička je unikátní produkt, který slouží jako měřidlo nasazené přímo na výrobní linku, jehož účel je kontrolovat kvalitu každého vyrobeného dílu. Kromě přesnosti je důležitá především rychlost měřicího cyklu, který nesmí zdržovat výrobu, čímž se odlišuje od klasických souřadnicových měřidel. Bylo navrženo řešení na konkrétních datech ze sériové výroby ložiskových kroužků. Hlavička umístěná ve výrobní lince vyhodnocuje v čase měřicího cyklu menším než 5 vteřin 8 zákaznickem požadovaných parametrů. Na přímo kontrolovaných rozměrech měří s opakovatelností do 2 mikrometrů.

Klíčová slova: Dotykové měření; LVDT snímače; kontrola kvality; komparační měření

1. Úvod

Česká firma Amest s.r.o. vyvinula vlastní měřicí hlavičku pro univerzální použití v sériové strojírenské výrobě. Tato hlavička byla vyvinuta na základě vysoké poptávky po zařízení, které je univerzální, snadno přenastavitelné a nasazené přímo do výrobní linky tak, aby nebyl zdržován výrobní proces a zároveň byla zachována nebo zlepšována kontrola kvality.

Úkolem této práce je zpracovat naměřená data z konkrétní aplikace této hlavičky. Měřeným dílem je kroužek kuželíkových ložisek firmy Timken. Je požadováno měření 8 parametrů (vnitřní průměr ve 4 řezech, sklon vnitřního kužele, konvexnost vnitřního kužele, vnější průměr kroužku, výška kroužku) v čase cyklu menším než 5 vteřin.

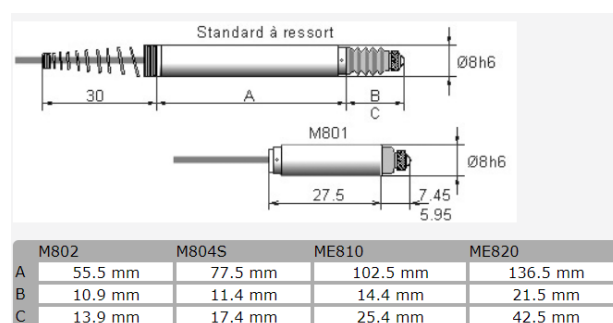
Hlavička proměřuje díl krouživým pohybem, který je snímán dvěma LVDT senzory. Data jsou vůči sobě posunutá o 90°. Klíčové pro rychlost měření je vzorkovací frekvence a schopnost vyhodnotit co nejvíce parametrů z jedné otáčky této hlavičky. Na vychylovací část měřicí hlavičky je možné umístit unikátně navrženou konstrukci, která se specificky dotýká měřeného dílu. Data vytvoří obrazec, jehož vyhodnocení je cíl této práce. Jedná se o komparační měření, a tudíž je nejprve nutné hlavičku zkalibrovat pomocí etalonu, jehož rozměry jsou známy s vyšší přesností, než je přesnost hlavičky. Hlavička následně porovnává hodnoty naměřeného etalonu s naměřeným dílem.

Na získaná data je aplikována nejprve filtrace Vold-Kalmanovým filtrem prvního řádu a následně analýza extrémů pomocí numerické derivace. Pro získání výsledků měření je použito znalosti geometrie vycházející z konstrukce mechanických doteků, které proměřují díl. Veškeré zpracování dat probíhá v prostředí aplikace Scilab.

2. Dynamická měřicí hlavička Amest

Měřicí hlavička krouživým pohybem měří rozměry daného kusu kontaktem skrze speciálně navržený dotek. Každý dotek je unikátně navržený pro daný kontrolovaný kus. Vychýlení dynamické části je snímáno dvěma o 90° posunutými indukčnostními (LVDT) snímači Metro M802 (obr. 1) - výstupem jsou tedy hod-

noty x a y . Bližší specifikace použitých snímačů se nachází v tabulce 1.



Obr. 1. Snímač Metro [1]

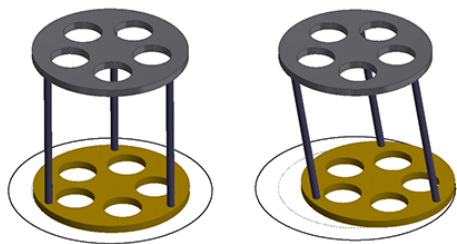
Vychylovací mechanismus pracuje na principu rovinného paralelogramu (obr. 2), z čehož plyne, že každý bod vychylovací měřicí části se tedy pohybuje po části povrchu koule. Poloměr této koule by měl být dostatečně velký, aby se mohlo uvažovat, že se vychylovací měřicí část pohybuje v jedné rovině.

Jako vyhodnocovací jednotka snímače Metro M802 byl použit produkt TB8 firmy IMECO s.r.o. Tato jednotka byla nastavena na frekvenci vzorkování 100 Hz, při níž má rozlišení 0,01 μm [2].

Tabulka 1. Specifikace snímače Metro M802 [1]

Typ snímače:	Metro M802
Měřicí rozsah:	± 1 mm
Opakovatelnost:	0,15 μm
Pracovní teplota:	5 – 80 °C
Stupeň krytí:	IP 65

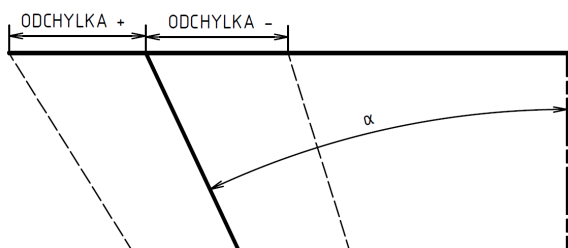
*Kontakt na autora: Michal.Kuchar@fs.cvut.cz



Obr. 2. Princip vychýlení dynamické hlavice Amest.

3. Měření dílu a jeho parametry

Jedná se o kroužek kuželkového ložiska firmy Timken (obr. 6). Požadované parametry k měření jsou uvedeny v tabulce 2. Jak vidno z výkresu, k výpočtu úhlu α , vyhodnocení konvexnosti a vyjádření virtuálního vnitřního průměru d , se používají tři průměry ve třech řezech. Úhel α byl pak zákazníkem pozměněn a místo vyjádření sklonu v úhlových jednotkách, byla požadována velikost odchylky (v mm) od bodu, kde by úhel α byl absolutně přesný (obr. 3).



Obr. 3. Znárodnění odchylky úhlu α .

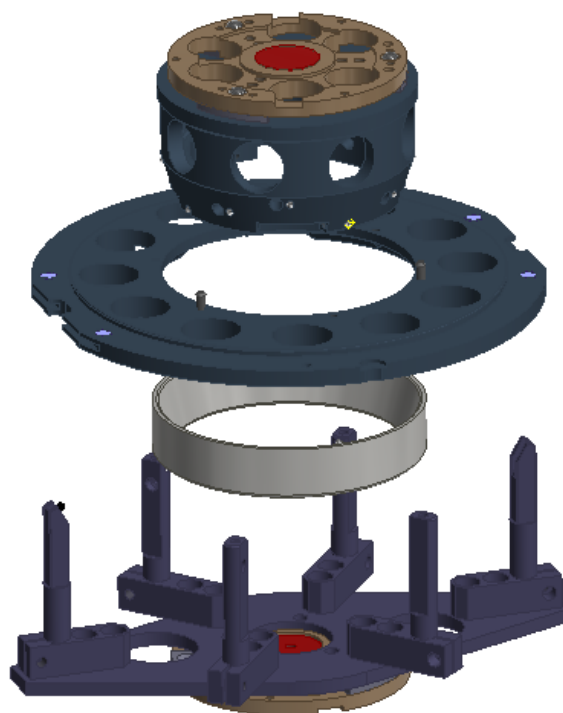
Tabulka 2. Měřené parametry

Měřený parametr:	Požadovaná opakovatelnost [μm]:
Vnitřní průměry ϕd , ϕd_1 , ϕd_2 , ϕd_3	5
Vnější průměr ϕD	2
Výška H	12
Úhel α_{dev}	0,8
Konvex/konkáv	0,8

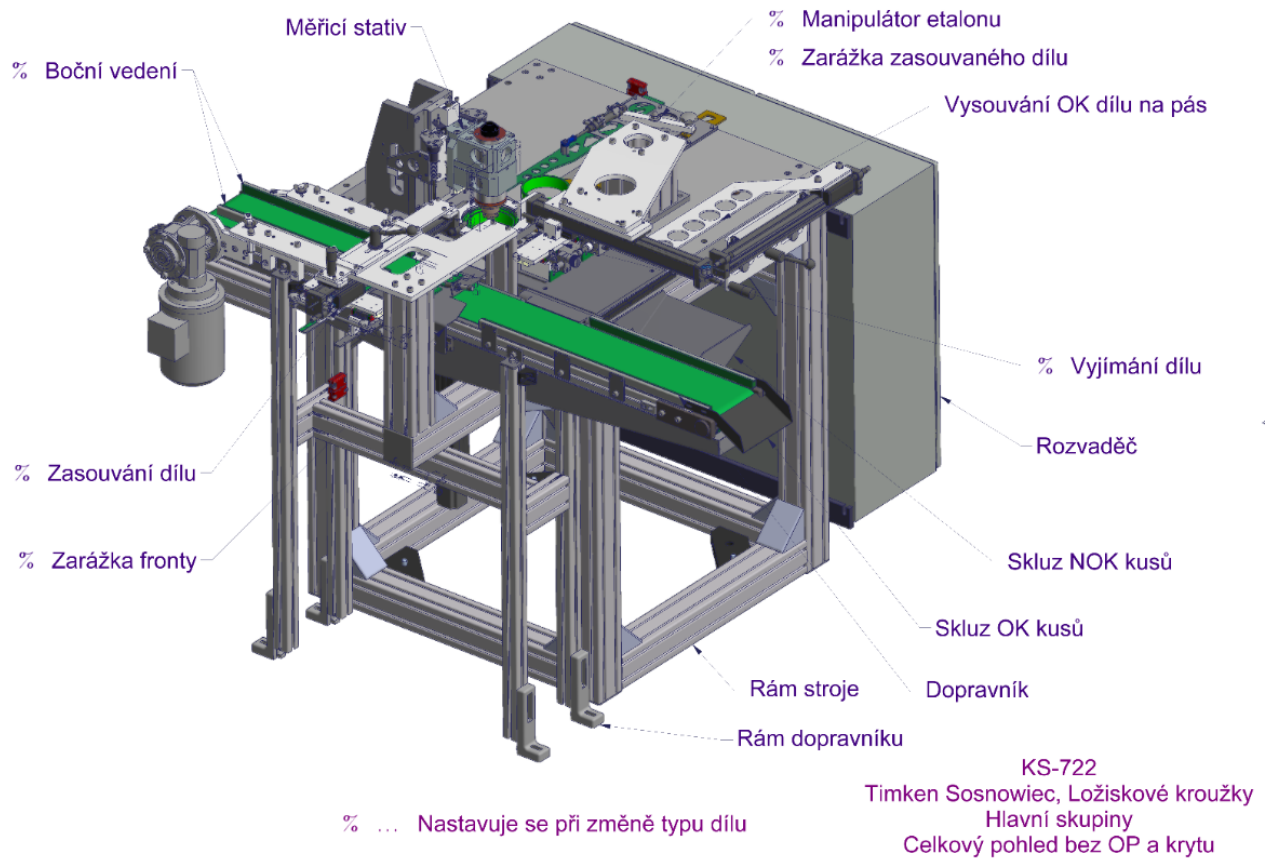
4. Automatická stanice pro měření ložiskových kroužků

Dynamická hlavice je implementována do zautomatizovaného pracoviště výrobní linky. Klíčové pro vyhodnocení dat je znalost geometrie mechanických doteků (obr. 4). Díl je neprve upnut přítlačnou deskou. Po upnutí zajede do dílu horní a spodní dotek (obr. 5). Doteky krouživým pohybem proměřují vnitřní i vnější rozměry. Spodní dotek se mimo dílu dotýká i přítlačné desky, čímž proměřuje výšku ložiskového kroužku.

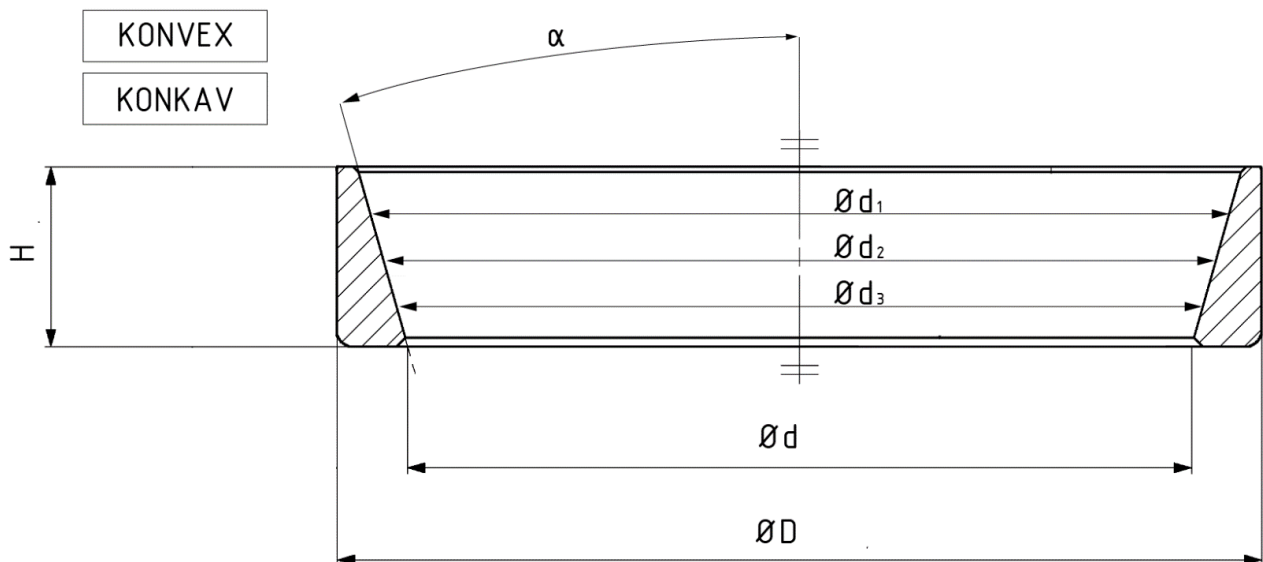
Součástí stanice je manipulační technika v podobě pneumatických válců, jež má na starost vkládání dílu do stanice a následné vyjmutí zpět na dopravník.



Obr. 4. Rozložený pohled horního doteku, přítlačné desky, měřeného dílu a spodního doteku.[3]

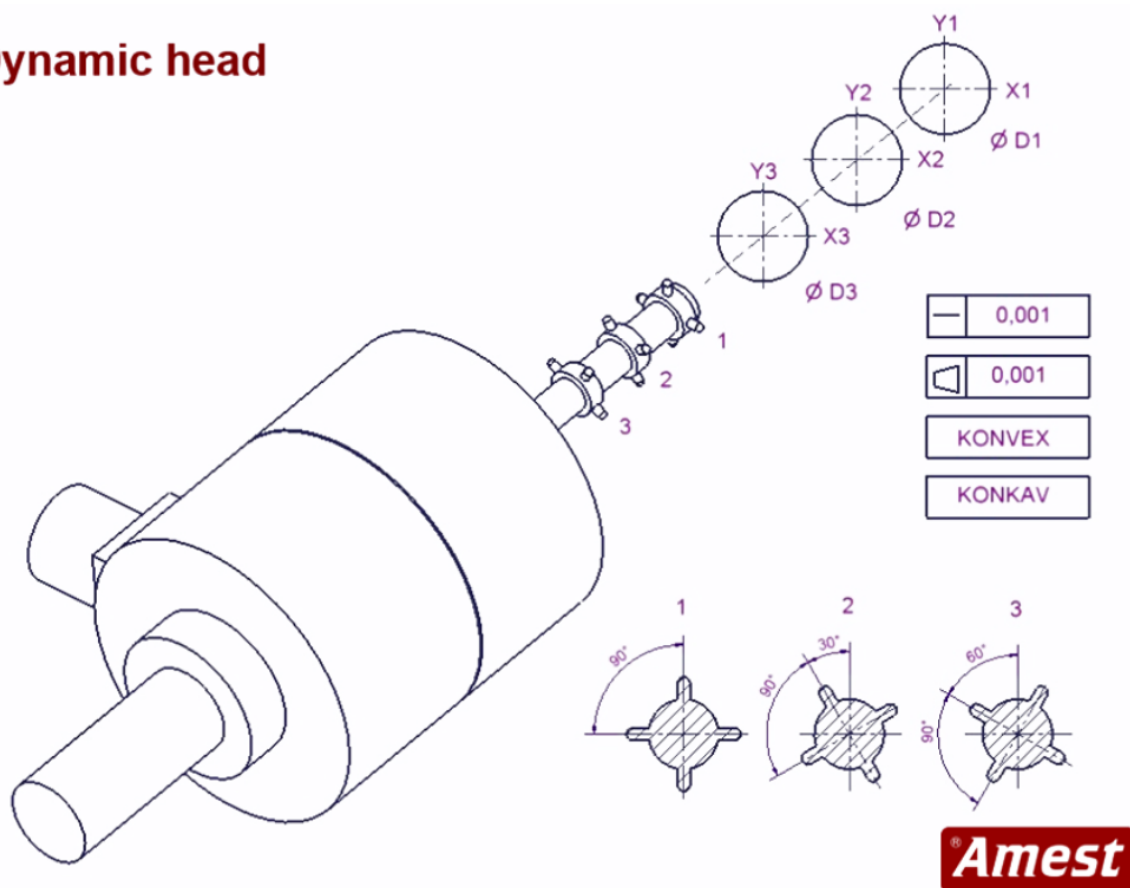


Obr. 5. Celkový pohled na automatickou měřicí stanici, ve které je implementována měřicí hlavice [3]



Obr. 6. Měřený díl a jeho parametry.

Dynamic head



Obr. 7. Znárodnění principu měření ve třech řezech pomocí jedné hlavice.[3]

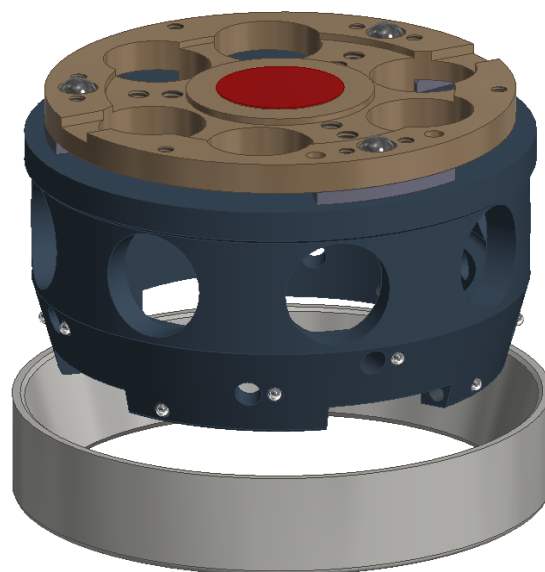
5. Způsob měření pomocí hlavice Amest

Jak již bylo řečeno v úvodu, hlavice Amest krouživým pohybem měří mechanickým dotykem rozměry dílů. Každý díl a jeho parametry vyžaduje speciálně navržený dotek. Parametry ložiska Timken jsou měřeny dvěma hlavicemi, jednou seshora a druhou zespona. Každá hlavice má svůj vyměnitelný dotek. Horní hlavice měří vnitřní průměry ve třech řezech, z nichž se dopočítává parametr α , konvexnost K a virtuální průměr d . Spodní hlavice měří výšku H a vnější průměr D .

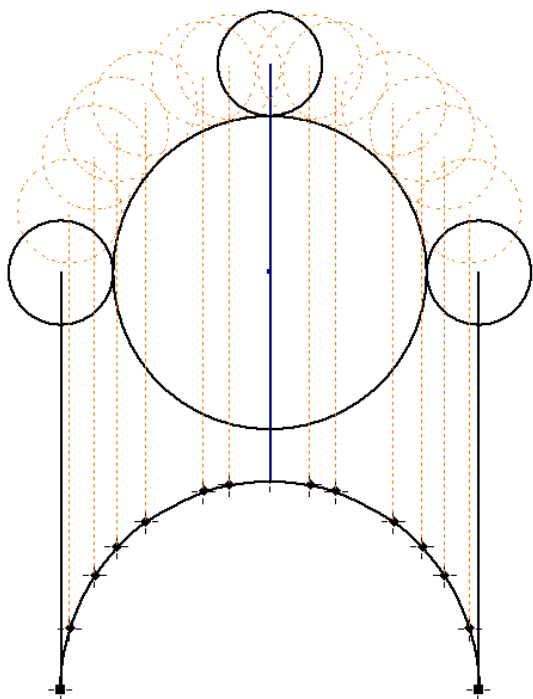
5.1. Měření horní hlavice

Horní dotek měří vnitřní průměry pomocí 4 bodů, které jsou pro každý řez vůči sobě pootočený (obr. 7). Výsledný graf ze snímačů tvoří obrazec (zdánlivě dvanáctiúhelník). Každý vrchol tohoto „dvanáctiúhelníku“ je místo, kdy nastává přechod dotyku z jedné kuličky na druhou a každá hrana je trajektorie měřicí kuličky vzniklá pohybem po povrchu kuželové plochy. Vzhledem k tomu, že se jedná o pohyb kuličky po kuželové, případně válcové ploše, tak je jasné, že se tedy nejedná o rovnou úsečku, ale o křivku vyššího řádu. Jelikož je poměr velikostí měřicí kuličky, měřené válcové plochy a délky trajektorie jedné kuličky velký, tak se zdá, že se jedná o část přímky. Když kuličkový dotek kopíruje obrys válcové plochy, tak vznikne křivka (obr. 9), která má extrém v místě, kde spojnice středu kuličky a měřicí hlavice prochází osou měřené válcové/kuželové plochy. Tento bod je klíčový pro vyhodnocení měření a pro každý průměr jsou hledány čtyři tyto body. K nalezení těchto bodů

byla nejprve převedena data ze snímačů (x a y) na polární souřadnice r a φ dle rovnic 1 a 2.



Obr. 8. Model horního doteku nad měřeným ložiskovým kroužkem [3].



Obr. 9. Grafické znázornění trajektorie pohybu kuličky po válcové ploše.

$$r(k) = \sqrt{x(k)^2 + y(k)^2} \quad (1)$$

$$\varphi(k) = \arctg\left(\frac{y(k)}{x(k)}\right) \quad (2)$$

Lokální extrémů jsou nalezeny na průběhu průvodiče r a přiřazeny konkrétnímu doteku pomocí úhlové

souřadnice φ . K nalezení lokálních extrémů bylo využito numerické derivace a knihovny s názvem Peaks detector [4]. Jak známo z matematické analýzy, extrém se vyhodnotil tam, kde se numerická derivace blížila k nule.

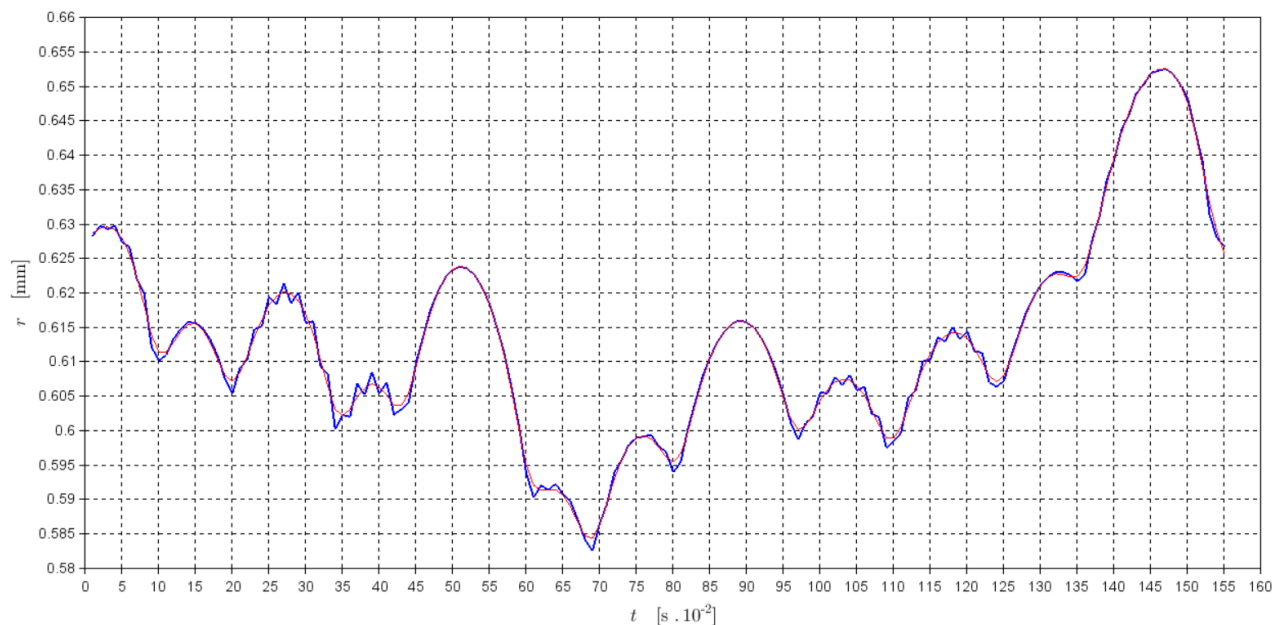
Snímačová data ovšem obsahovala šum a průběh tedy nebyl hladký. Z tohoto důvodu tudíž použití numerické derivace selhávalo a extrémy se objevovaly na nerelevantních místech. Z toho důvodu jsem zvolil použití Vold-Kalmanova filtru prvního řádu [5]. Na obr. 10 jsou znázorněna překrytá naměřená i filtrovaná data.

Byl zaveden vektor nalezených extrémů (peaků) s označením \mathbf{p} , který obsahuje 12 hodnot vyjadřujících pozici peaku. Na obr. 12 je znázornění dat \mathbf{x} a \mathbf{y} , tak i jejich převedení na průběh průvodiče (přesněji pouze odchylky průvodiče od střední hodnoty kvůli zvýraznění extrémů). Po zjištění extrémů následovalo přiřazení k jednotlivým řezům dle tabulky 3.

Tabulka 3. Přiřazení jednotlivých extrémů k danému řezu podle úhlové souřadnice φ

Určení řezu:	Rozsah úhlu φ [°]:
Řez pro ϕ_{d1}	$(-15, 15) \cup (75, 105) \cup (165, 195) \cup (255, 285)$
Řez pro ϕ_{d2}	$(15, 45) \cup (105, 135) \cup (195, 225) \cup (285, 315)$
Řez pro ϕ_{d3}	$(45, 75) \cup (135, 165) \cup (225, 255) \cup (315, 345)$

Každému řezu byly přiřazeny 4 body, které nesly informaci o poloze extrémů (peaků). Pozice peaků ve vektoru \mathbf{p} je seřazena vzestupně podle úhlové souřadnice (tj. peak v úhlovém rozsahu -30 – 30 ° je na první pozici v tomto vektoru). Výpočet samotného průměru je spočítán z kartézské vzdálenosti protilehlých bodů. Vzhledem k tomu, že na každý řez připadají čtyři body a tedy dvě na sebe kolmé úsečky, je spočítán aritmetický průměr z velikostí těchto úseček (3, 4, 5).



Obr. 10. Naměřená data (modře) a filtrovaná data (červeně)

$$d_{1,1} = \sqrt{(x(p_{(1)}) - x(p_{(7)}))^2 + (y(p_{(1)}) - y(p_{(7)}))^2} \quad (3)$$

$$d_{1,2} = \sqrt{(x(p_{(4)}) - x(p_{(10)}))^2 + (y(p_{(4)}) - y(p_{(10)}))^2} \quad (4)$$

$$d_1 = \frac{d_{1,1} + d_{1,2}}{2} \quad (5)$$

Obdobně platí pro zbylé průměry.

Parametr α_{dev} je vypočten jako odchylka rozdílu změřeného největšího a nejmenšího poloměru ($d1/2$ a $d3/2$) od jmenovitého rozdílu největšího a nejmenšího poloměru – $\Delta r_{nominal}$ (6).

$$\alpha_{dev} = \frac{d_3 - d_1}{2} - \Delta r_{nominal} \quad (6)$$

Virtuální průměr d lze spočítat z reálného úhlu α . (7)

$$d = 2 \cdot \left(\frac{d_1}{2} - H_1 \cdot tg(\alpha) \right) \quad (7)$$

Kde:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{d_3 - d_1}{2 \cdot (H_3 - H_1)} \right) \quad (8)$$

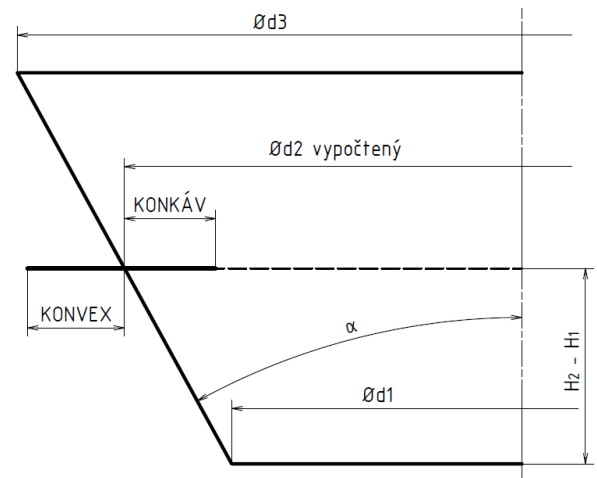
Parametry H_1, H_3 jsou výšky řezů, ve kterých se průměry nacházejí.

Konvexnost/konkávnost je počítána podobně jako parametr α_{dev} . Na úsečce mezi krajními body průměrů d_1 a d_3 by se v ideálním případě měl nacházet i

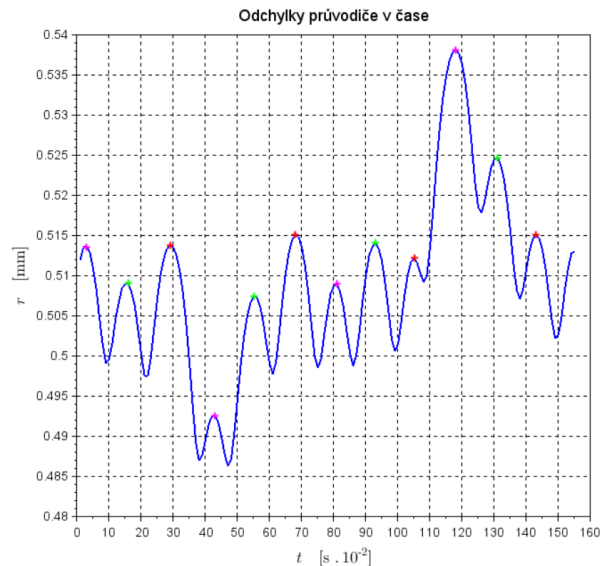
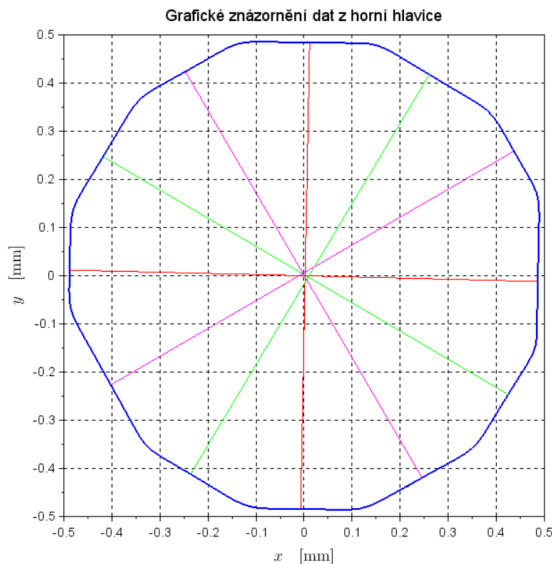
krajní bod průměru d_2 . Je tedy vypočítána hodnota, jakou by měl mít průměr d_2 (respektive poloměr $\frac{d_2}{2}$) (9). Hodnota je vypočítána lineární interpolací z poloměrů $\frac{d_1}{2}$ a $\frac{d_3}{2}$. Konkávnost/konkávnost je odchylka od tohoto vypočteného poloměru (10). Konkávnost značí kladná hodnota a konkávnost záporná.

$$d_{2_{calc}} = 2 \cdot \left(\frac{d_1}{2} + (H_2 - H_1) \cdot tg(\alpha) \right) \quad (9)$$

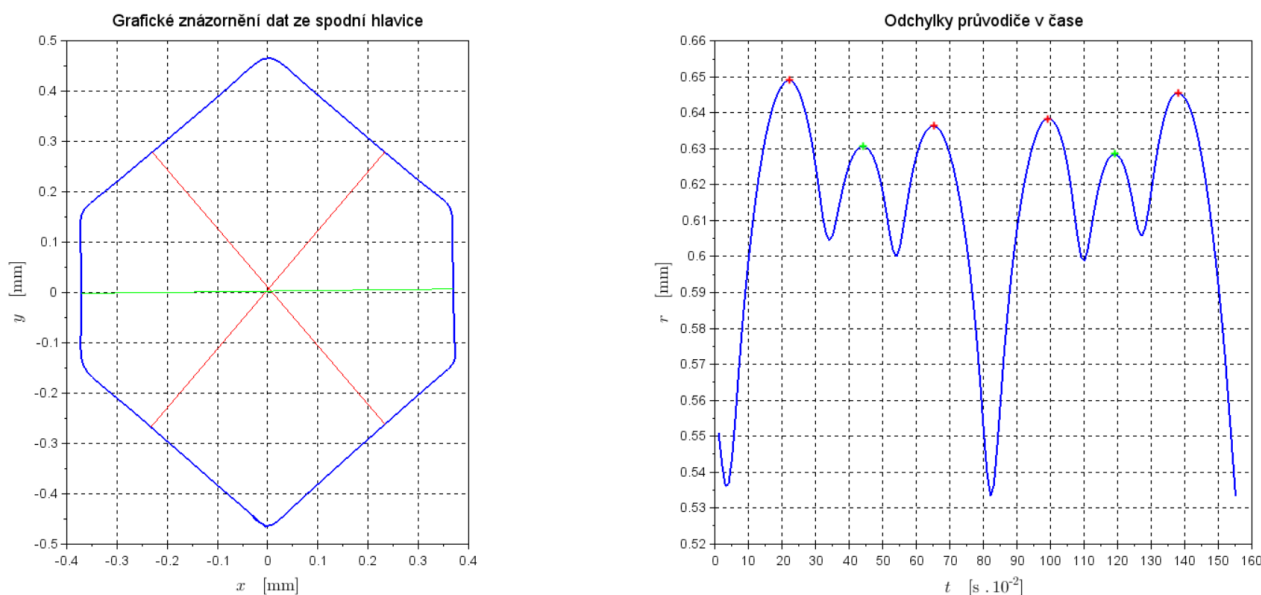
$$K = \frac{d_2 - d_{2_{calc}}}{2} \quad (10)$$



Obr. 11. Schema výpočtu konkávnosti/konvexnosti.



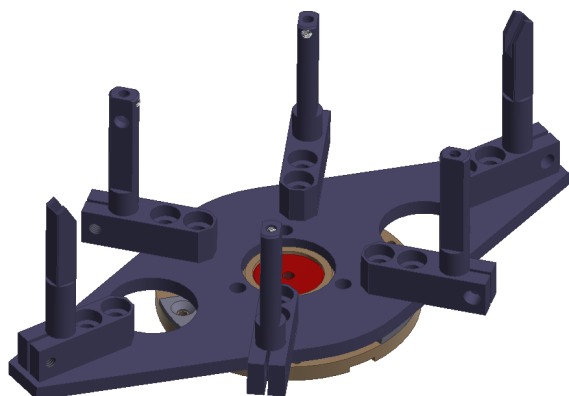
Obr. 12. Znázornění dat z horní hlavice. Na levém obrázku jsou zobrazena data ze snímačů a v nich vyznačeny jednotlivé řezy oddělené barvami. Na pravém obrázku se nachází průběh odchylek průvodiče od střední hodnoty v čase. Na průběhu průvodiče jsou vyznačeny zjištěné extrémy opět oddělené barvami tak, že každý bod pro jeden řez má stejnou barvu.



Obr. 15. Znázornění dat ze spodní hlavice. Na levém obrázku jsou zobrazena data ze snímačů a v nich vyznačeny jednotlivé vzdálenosti použité pro další vyhodnocení. Na pravém obrázku se nachází průběh odchylek průvodiče od střední hodnoty v čase. Na průběhu průvodiče jsou vyznačeny zjištěné extrémy opět oddělené barvami tak, že červená značí bod příslušný k vnějšímu průměru a zelená k výšce.

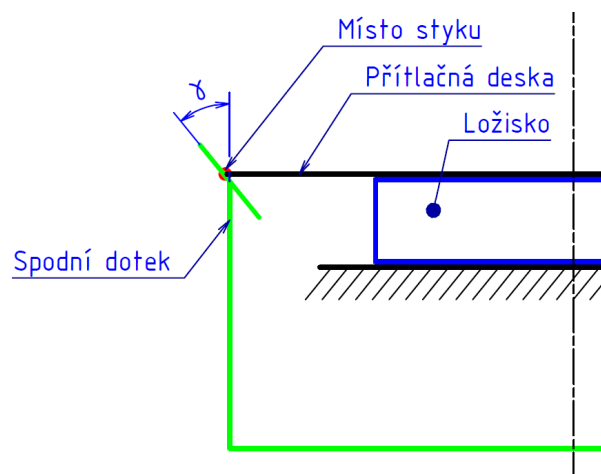
5.2. Měření spodní hlavice

Spodní hlavice firmy Amest měří vnější průměr obdobně jako horní hlavice vnitřní. Stačí pouze jeden řez, a tedy čtyři navržené dotyky s tvrdokovovými kuličkami. Dotyky jsou rozloženy po 90° (obr. 13). Měření výšky je zrealizováno skrze přitlačnou desku, která pasuje na horní plochu ložiska a přitlačí tím ložisko k základně. Dojezd přitlačné desky je tedy určen výškou ložiska. V této desce se nacházejí na okrajích tvrdokovové tyčky, které jsou mechanickým dotykem proměřeny hlavici skrze zkosení (obr.14). Výsledný obrazec z dat x a y dolní hlavice je znázorněn na obr 15.



Obr. 13. Model spodního doteku [3]

Pro výpočet výšky H je potřeba nejprve vypočítat kartézskou vzdálenost dvou zjištěných bodů d_H a následně jejich vynásobení směrnici úhlu γ , který



Obr. 14. Schéma měření výšky spodním dotykem

Měření vnějšího průměru D je totožné s měřením vnitřních průměrů d_1, d_2, d_3 . Změní se pouze úhlový rozsah, v kterém se hledají extrémy. Z dat spodní hlavice se získá pouze 6 extrémů: 4 pro průměr D a 2 pro výšku H .

Tabulka 4. Přiřazení jednotlivých extrémů z dat spodní hlavice k danému parametru podle úhlové souřadnice φ

Určení parametru:	Rozsah úhlu φ [°]:
Řez pro ϕD	$(30, 90) \cup (90, 150) \cup (210, 270) \cup (270, 330)$
Řez pro H	$(-30, 30) \cup (150, 210)$

svírá svislá osa s dotekem měřícím výšku (11).

$$H = \frac{d_H}{2 \cdot \operatorname{tg}(\gamma)} \quad (11)$$

6. Výsledky

Automatická měřicí stanice Amest byla odzkoušena. V rámci zkoušení bylo provedeno 1000 různých měření, které ověřovali mimo jiné i schopnost přenastavitelnosti na jiný typorozměr. Důležitým výsledkem je opakovatelnost měření stejného dílu. Opakovatelnost na 20 měřeních stejného dílu je ke dni zpracování tohoto článku uvedena v tabulce 5:

Tabulka 5. Výsledky testování automatické měřicí stanice Amest

Celkový čas cyklu:	4,8 [s]
Čas měření bez manipulace s dílem:	2 [s]
Počet vzorků na jedno měření:	160
Vzorkovací frekvence:	100 [Hz]
Doba ustálení:	300 [ms]
Opakovatelnost parametru d_1, d_2, d_3, d, D:	2 [μm]
Opakovatelnost parametru H:	6 [μm]
Opakovatelnost parametru K, α_{dev}:	0.5 [μm]

Z výsledků je vidno, že čas samotného měření je menší než čas, který je potřebný k manipulaci s dílem. Zákazník požaduje čas nadále zkracovat.

Opakovatelnost jednotlivých parametrů splňuje podmínky, jen parametr D se nachází přesně na požadované hranici. Je nutné podotknout, že na opakovatelnost má vliv i kruhovitosť samotného dílu, jelikož průměry jsou měřeny čtyřbodově. Nejhorší opakovatelnost má parametr H , což je jen důsledek vlivu měření skrze zkosení (tudíž je vypočtený průměr navíc dělen tangentou zkosení γ) a také jako jediný parametr je měřen dvoubodově. Nejlepší opakovatelnost

mají parametry α_{dev} a K , což je opět důsledkem výpočtu, jelikož tyto parametry vycházejí z násobků parametrů d_1, d_2, d_3 (tyto násobky jsou menší než 1).

6.1. Návrh na zlepšení

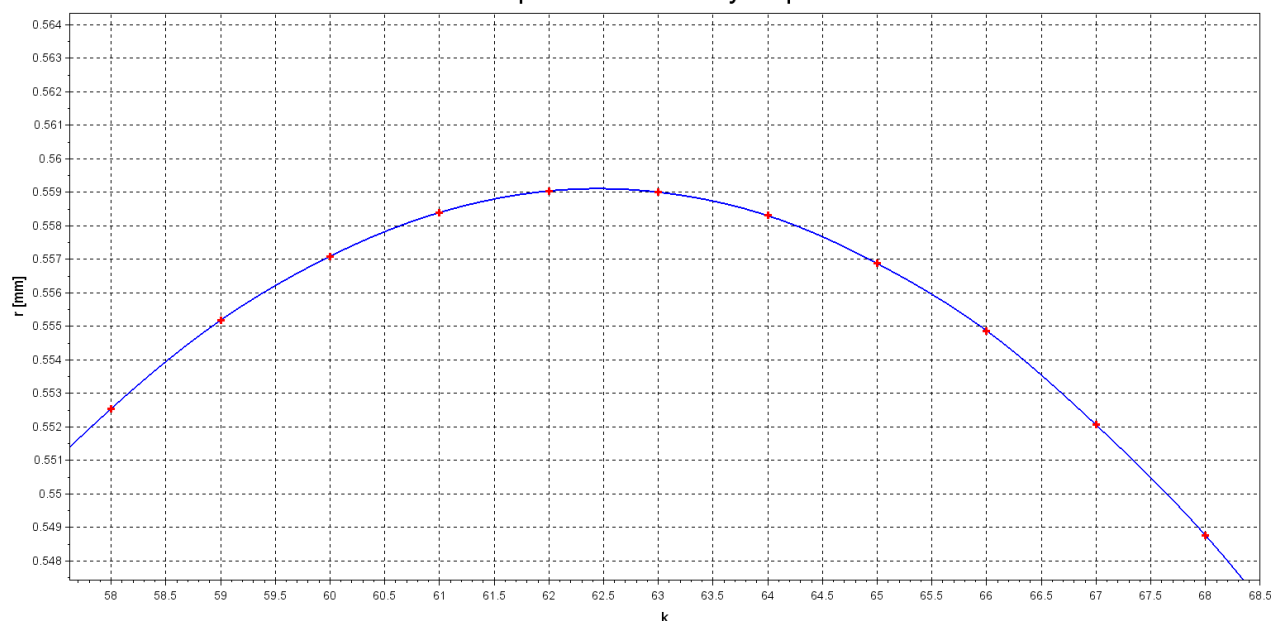
Rezervy jsou určitě v rychlosti pohybů manipulační techniky, ale je možné například snižovat počet vzorků a data aproximovat (případně interpolovat) křivkou, z nichž by se mohla odečíst přesnější hodnota extrémů. Předběžně jsem použil interpolaci dat kubickým splinem (obr. 16) [6], díky němuž je částečně možné kompenzovat malou frekvenci vzorkování. Metoda je ovšem pouze ve fázi vývoje a není řádně otestována.

Dále je možná kalibrace měřicí hlavičky, jelikož není v celém svém rozsahu lineární. Nelinearita ale není tolik významná v případě, že jsou upnutí dílu a jeho odchylky velmi podobné, a tudíž hlavička měří pořád v téměř stejných vychýleních.

7. Závěr

Tato práce nejprve analyzovala konstrukci a kinematiku měřicí hlavičky Amest a její aplikaci na ložiskové kroužky firmy Timken. Po analýze geometrie následovalo zpracování dat. Data byla nejprve filtrována Vold-Kalmanovým filtrem prvního řádu a následně byly vyhodnoceny extrémny průvodiče. Každý extrém byl přiřazen příslušnému parametru pomocí úhlové souřadnice. Po zjištění potřebných bodů byly vypočteny všechny parametry určené parametry. Parametr D prošel na hranici opakovatelnosti, ostatní parametry splnily zadání bez problémů. Nejlepší opakovatelnost přímo měřeného parametru byla 2 μm . Celkový čas cyklu činil 4,8 sekundy, z toho pouhé 2 sekundy vyžadovalo měření. Dále byla ještě navržena optimalizace pro zkrácení času cyklu pomocí interpolace dat kubickým splinem. Závěrem je třeba říct, že byl zpracován v průmyslu aplikovaný produkt, po kterém je vysoká poptávka.

Interpolace dat kubickým splinem



Obr. 16. Interpolace dat kubickým splinem. Červené body jsou naměřené hodnoty a modrý je interpolační spline.

Poděkování

Poděkování patří firmě Amest s.r.o., která mi dala příležitost podílet se na reálném výzkumném projektu aplikovaném v průmyslu.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. *SGS18/177/OHK2/3T/12*.

Seznam symbolů

D	vnější průměr ložiskového kroužku (mm)
d_1	vnitřní průměr ložiskového kroužku ve výšce H_1 (mm)
d_2	vnitřní průměr ložiskového kroužku ve výšce H_2 (mm)
d_3	vnitřní průměr ložiskového kroužku ve výšce H_3 (mm)
$d_{1,1}$	první složka průměru d_1 (mm)
$d_{2,1}$	první složka průměru d_2 (mm)
$d_{3,1}$	první složka průměru d_3 (mm)
$d_{1,2}$	druhá složka průměru d_1 (mm)
$d_{2,2}$	druhá složka průměru d_2 (mm)
$d_{3,2}$	druhá složka průměru d_3 (mm)
$d_{2_{calc}}$	vypočtený průměr pro výpočet konvexnosti vnitřního povrchu ložiskového kroužku (mm)
d_H	průměr pro výpočet výšky H (mm)
H	výška ložiskového kroužku (mm)
H_1	poloha výšky v kterém se nachází vnitřní průměr d_1 (mm)
H_2	poloha výšky v kterém se nachází vnitřní průměr d_2 (mm)
H_3	poloha výšky v kterém se nachází vnitřní průměr d_3 (mm)
K	Odchylka od vypočteného průměru d_2 značící konvexnost a konkávnost vnitřní plochy ložiskového kroužku (mm)
k	složka diskrétního času (–)

p	vektor pozic nalezených extrémů (–)
r	vektor hodnot průvodiče naměřených dat (mm)
x	vektor naměřených hodnot z prvního snímače (mm)
y	vektor naměřených hodnot z druhého snímače (mm)
α	úhel vnitřního kužele ložiskového kroužku (od osy) ($^\circ$)
α_{dev}	Odchylka od vypočteného průměru d_3 značící míru nepřesnosti úhlového parametru α (mm)
γ	úhel který svírá spodní dotek pro měření výšky se svislou osou ($^\circ$)
φ	vektor úhlových souřadnic naměřených dat ($^\circ$)

Literatura

- [1] *Inductive HBT gauging probe*. METRO SA. Dostupné z: http://www.metro-fr.com/en/inductive_gauging_probe_spring_push.php (cit. 28.03.2019).
- [2] *Systémová jednotka TB8.1xx*. IMECO s.r.o. Dostupné z: <http://www.imeco.cz/> (cit. 28.03.2019).
- [3] Interní materiály firmy Amest. Amest s.r.o., Belnická 736, Jesenice.
- [4] Jean-Luc Goudier. *Peaks detector*. Dostupné z: <https://fileexchange.scilab.org/toolboxes/209000> (cit. 28.03.2019).
- [5] Jason R Blough. *Understanding the Kalman/Vold-Kalman Order Tracking Filters' Formulation and Behavior*. Tech. zpr. SAE Technical Paper, 2007.
- [6] *Cubic spline interpolation*. Scilab Enterprises. Dostupné z: https://help.scilab.org/docs/5.3.3/en_US/splin.html (cit. 28.03.2019).