

Bezkontaktné meranie tvaru telies pomocou optických metód

Ing. Peter Kat'uch PhD., Ing. Jozef Kováč
Technická univerzita v Košiciach

Existuje veľké množstvo súčiastok, ktoré sú nemerateľné tradičnými dotykovými metódami. V prípade objektov, ktorých plochy sú pre dotyky snímačov neprístupné, príliš malé alebo poddajnosť meraného objektu znemožňuje presné nasnímanie bodu bez deformácie, sú bezdotykové metódy jedinou možnosťou ako kvantifikovať objekt.

V súčasnosti je meranie tvarových odchýlok neoddeliteľnou súčasťou kontroly kvality súčiastok. Pre dosiahnutie vysokej spoľahlivosti nie je možné zaoberať sa len s tolerovaním dĺžkových či uhlových rozmerov. Preto sa pri predpise vo výkresovej dokumentácii stretávame s geometrickými toleranciami. Norma STN EN ISO 1101 delí geometrické tolerancie do štyroch skupín. Sú v nej obsiahnuté tolerancie tvaru, orientácie, polohy a hádzania. Obrázok 1 popisuje, ako sa tieto skupiny postupne delia na jednotlivé charakteristiky.



Obr. 1 Rozdelenie geometrických tolerancií podľa STN EN ISO 1101

V oblasti tolerovania a merania tvaru sa najčastejšie zameriava pozornosť na priamosť, rovinnosť, kruhovitosť a valcovitosť. Občas je možné vidieť aj predpisy charakteristík, ktoré norma neobsahuje. Sú väčšinou definované internými predpismi. Sem patria napríklad guľovitost', kuželovitost', tvar evolventy atď. Tie sa na výkresoch predpisujú obecné buď ako tolerancie tvaru profilu prípadne tvaru plochy.

V tomto príspevku sa zameriame na jednu z vybraných tvarových charakteristík - kruhovitosť, nakoľko popis predpisovania, merania a vyhodnocovania všetkých tvarových charakteristík by nebol účelný a kruhovitosť patrí obecné k najčastejšie sa vyskytujúcim charakteristikám.

Pri vyhodnotení tvarových odchýlok je pre objektívne posúdenie potrebné získať väčšie množstvo povrchových bodov. Na definovanie kružnice, ktorá je ideálnym ekvivalentom meranej plochy pri vyhodnocovaní kruhovitosti, matematicky postačujú tri body, cez ktoré prechádza kružnica. Obecné je možné vypočítať (s určitým priblížením) polomer kružnice, avšak v tomto prípade by bola odchýlka kruhovitosti

nulová, nakoľko žiadny z bodov nevybočuje mimo ideálny tvar. Snímanie malého počtu bodov tiež nedáva objektívne výsledky pretože môže dôjsť k nekomplexnému popisu z dôvodu výberu nevhodných bodov. Preto je pri meraní potrebné vybrať adekvátny počet bodov pre optimálne výsledky.

Pri dotykovom meraní, ktoré je v praxi zaužívanéjšie než meranie bezdotykové, sa v poslednej dobe najčastejšie využívajú kruhomery (nazývané aj formtestre) s osadenými páčkovými odchýlkomermi alebo súradnicové meracie stroje. Zber dát a vyhodnotenie sprostredkováva počítač alebo vyhodnocovacia jednotka prístroja.

V prípade bezdotykových snímačov sa využívajú rôzne fyzikálne princípy snímania. Najbežnejšie sú optické, no v špecifických aplikáciách sa využívajú aj princípy indukčné (princíp vírivých prúdov), kapacitné, ultrazvukové, magnetické, prípadne ďalšie. Ich nasadenie závisí od typu meraných súčiastok a navrhujú sa väčšinou jednoúčelovo.

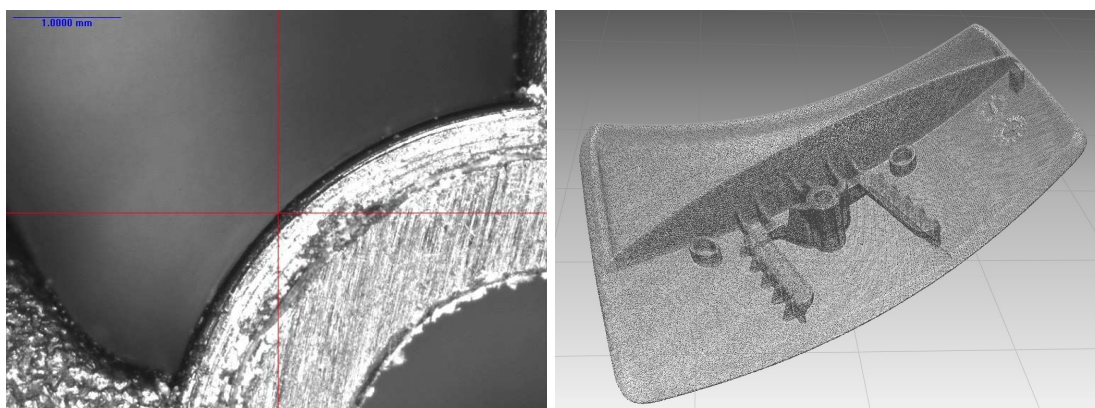
Optické prístroje sú na druhej strane vyrábané prevažne ako univerzálne zariadenia a sú bežnou súčasťou metrologickej praxe. Vo forme meracích mikroskopov či profilprojektorov boli využívané v minulosti dokonca vo výrazne väčšom zastúpení, než prístroje dotykové.

Pri optoelektronických snímačoch sa z meraného objektu získava obraz, ktorý je ďalej spracovávaný a vyhodnocovaný. Modernou náhradou meracích mikroskopov sú kamerové systémy, pri ktorých je obraz snímaný CCD prípadne CMOS snímačom, ktorý nahrádza oko operátora pričom obraz je digitalizovaný a následne je spracovaný buď manuálne operátorom alebo automaticky za využitia vyhodnocovacieho softvéru. Pri tejto metóde sa hľadajú hrany a na nich sa identifikujú body. Preto je nevyhnutné vhodne zvoliť kontrast obrazu a osvetlenie zobrazovanej scény. Príkladom takýchto systémov sú meracie mikroskopy alebo súradnicové meracie stroje s osadenou kamerovou hlavou. Výhodou kamerovej snímacej hlavy ViScan firmy Carl Zeiss z obrázka 2 je možnosť jej osadenia na rotačnú RDS hlavu a tým získanie možnosti natočiť snímač do takmer ľubovoľnej pozície. Tieto snímače sa často používajú na meranie objektov, ktoré nie je možné kvôli ich takmer nulovému tretiemu rozmeru merať dotykovo (napr. dosky plošných spojov, kontrola potlače, plechové výstrižky atď.) alebo poddajné súčiastky (napr. gumové, polyuretánové alebo tenkostenné súčiastky z plastov).



Obr. 2 a) Súradnicový merací stroj Contura G2 b) Laserová snímacia hlava LineScan
c) Kamerová snímacia hlava ViScan d) Priemyselný tomograf Metrotom 1500

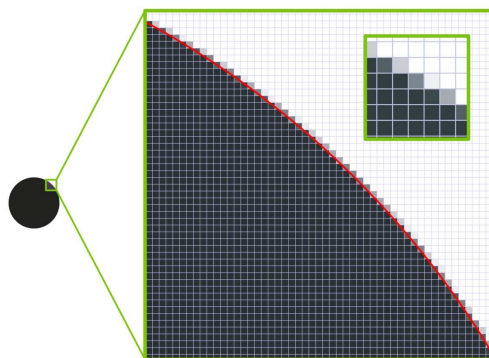
Na rozdiel od kamerových systémov sa pri laserových, podobne ako v prípade LineScanu firmy Carl Zeiss na obr. 2, snímajú povrchové body komplexného povrchu vyhodnocovaním tvaru a polohy čiary vytvorenej laserom. Postupným presúvaním laserovej stopy po povrchu sa zbierajú vysokou rýchlosťou osvetľované body a v softvérovom prostredí sú zobrazované ako tzv. mračno bodov v priestore reprezentujúce povrch reálneho dielu. Na obrázku 3a je zobrazený pohľad na meranú plastovú súčiastku pri manuálnom identifikovaní okrajových bodov valcovej časti a na obrázku 3b je znázornené mračno povrchových bodov tej istej súčiastky meranej priemyselným tomografom. Výhodou priemyselnej tomografie je získavanie mračna bodov nie len povrchu meranej súčiastky, ale celého objemu. Túto informáciu získavame vďaka tomu, že röntgenové žiarenie preniká materiálmi a tým stráca energiu v závislosti od hustoty materiálu a kumulovanej hrúbky, ktorou musí pri ceste od zdroja žiarenia k detektoru preniknúť. Na presné definovanie mračna bodov je potrebné nasnímať niekoľko stoviek röntgenových obrazcov (tzv. röntgennogramov) počas rotácie objektu okolo zvislej osi. Reprezentantom priemyselných tomografov je aj Metrotom 1500 firmy Carl Zeiss (obr. 2).



Obr. 3 a) Pracovné okno pri manuálnom meraní kamerovým systémom ViScan
b) Mračno povrchových bodov plastového dielu extrahovaných z merania na Metrotome 1500

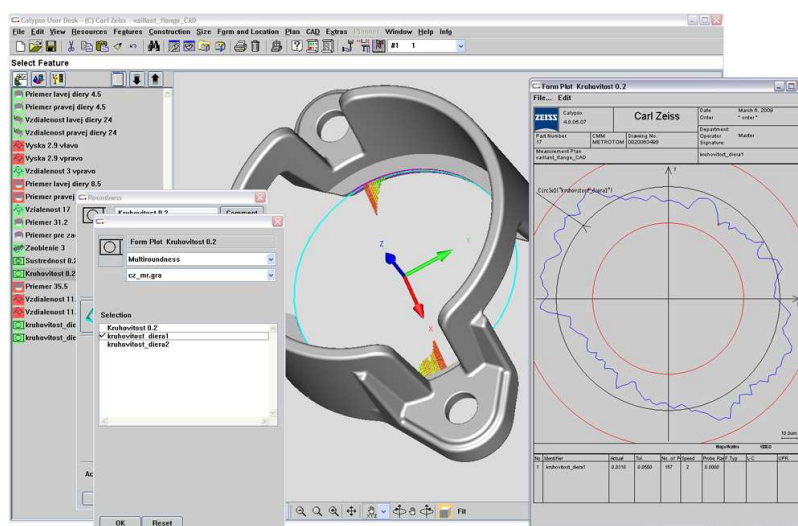
Spomínané optické metódy využívajú pre digitalizáciu obrazu detektory, ktoré menia žiarenie (svetlo, rtg,...) na informáciu. Detektory sú rastrované na malé body, tzv. pixle usporiadané na ploche. Obraz je detegovaný samostatnými snímačmi reprezentujúcimi pixely. Intenzita žiarenia je prevedená na informáciu (často 8 alebo 16 bitovú pre rôzne stupne šedej farby) a z týchto údajov je vyskladaný dvojrozmerný obraz. V prípade tomografu je navyše z jednotlivých obrazcov vygenerované mračno bodov, ktoré tvoria tzv. voxely (priestorové pixely – z angl. volume pixel). Veľkosť pixelov resp. voxelov priamo závisí na rozlíšení detektora. Veľkosť objektu prislúchajúca jednému pixelu teda závisí od zväčšenia premietaného obrazu a veľkosti snímača reprezentujúceho jeden pixel.

Pre získanie vyššej presnosti merania než je tá, ktorá by sa dala získať z rozlíšenia detektora sa využívajú matematické prepočty na menšie prvky než je pixel či voxel. Tejto metóde sa vraví subpixelizácia resp. subvoxelizácia. Pri snímaní reálneho objektu s detektorom, ktorý transformuje obraz na 16 bitovú informáciu ($2^{16}=65536$ úrovní šedej farby) je zvyčajne dosahované desaťnásobné zvýšenie rozlíšenia. Spôsob subpixelizácie obrazu je znázornený na obrázku 4.



Obr. 4 Princíp subpixelizácie

Stanovenie hodnoty tvarových odchýlok však zďaleka nezávisí len na rozlíšení prípadne nepresnosti prístroja na ktorom je prevádzkané meranie. Po digitalizácii obrazu je potrebné vybrať vhodný počet bodov a tiež metódu akou sa stanovená odchýlka vyhodnotí. Meracie prístroje firmy Carl Zeiss využívajú pre definovanie stratégií merania elementov a následné vyhodnotenie charakteristík softvér Calypso (obr. 5).



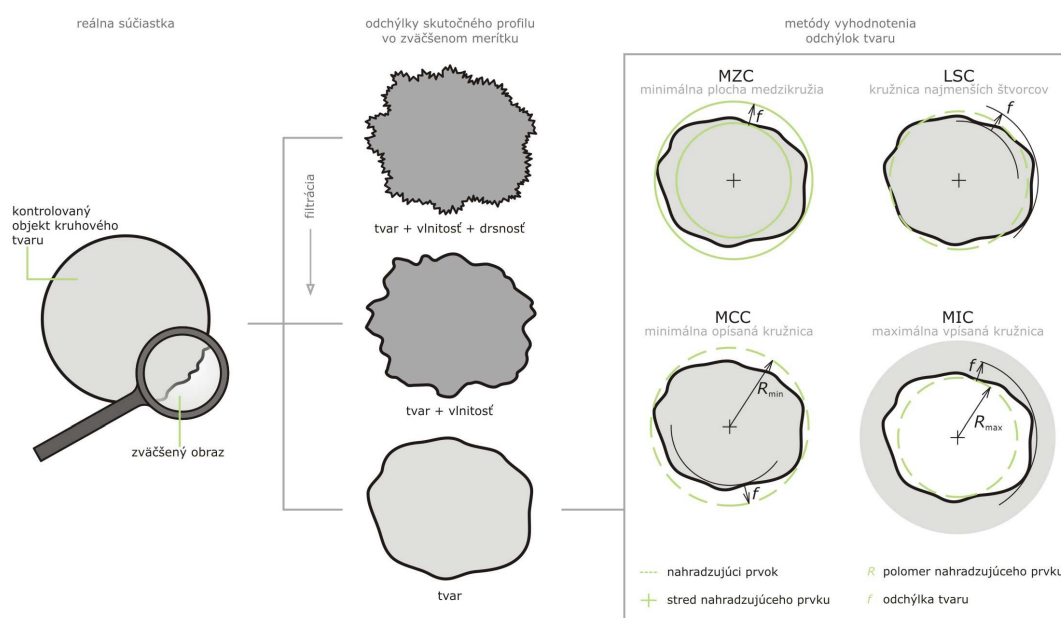
Obr. 5 Prostredie programu Calypso

Pri spracovaní údajov pre vyhodnotenie tvarových odchýlok sa často stretávame s filtrovaním vstupných dát. Oproti dotykovým metódam merania, kde sa napríklad pri súradnicových strojoch často využíva pre kontakt so súčiastkou dotyk v tvare gule, nedochádza pri optických metódach k filtrovaniu údajov tzv. „mechanickým filtrom“. Ten vzniká vplyvom tvaru a polomeru gule kopírujúcej povrch súčiastky. Preto je často povrch získaný optickými metódami „príliš drsný“. Pre vyhladenie a elimináciu výkyvov ponúka softvér Calypso viacero filtrov. Medzi najbežnejšie patria Gaussov filter, spline filter a 2RC filter (ekvivalent analógových filtrov používaných v elektronike). Podľa toho, ktoré harmonické zložky pri filtrovaní údajov pre vyhodnotenie kruhovitosti vypustíme rozlišujeme filtre dolnopriepustné (vypustia sa zložky s krátkou vlnovou dĺžkou, angl. low-pass filter), hornopriepustné (vypustia sa zložky s dlhou vlnovou dĺžkou, angl. high-pass filter) a ohraničené (kombinácia hornopriepustného s dolnopriepustným, angl. band-pass filter) Ukážka filtrovania dát dolnopriepustnými Gaussovými filtermi je na obr. 7. Pri kruhovitosti sa nastavuje

hranica, ktorá určuje, koľko vln na otáčku (tzv. UPR – z angl. undulations per revolution) určí limit pre zobrazenie harmonických zložiek.

Pri výskyte extrémnych hodnôt spôsobených špinou na povrchu prípadne v opačnom smere napr. škrabancom je vhodné využiť funkciu eliminácie odľahlých hodnôt, ktorej vhodným nastavením nedôjde ku skresľovaniu výsledku práve takýmito nepriaznivými hodnotami, ktoré by neprimerane zmenili hodnotu odchýlky kruhovitosti.

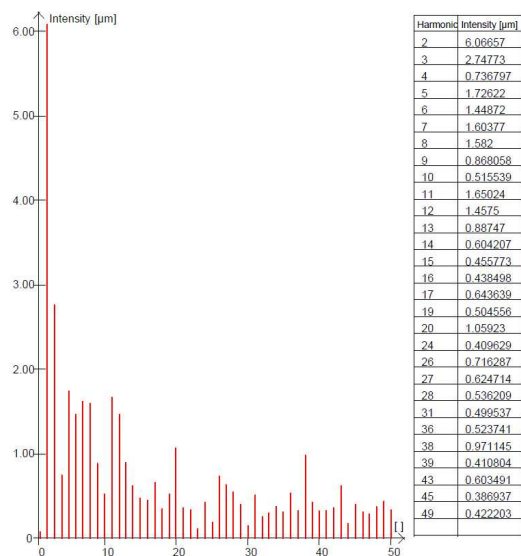
Ak je potrebné určiť, ktorá z harmonických zložiek má na tvar profilu najväčší vplyv, je vhodné využiť Rýchlu Fourierovú analýzu zložiek (tzv. FFT – z angl. fast Fourier transformation), ktorej výsledkom je graf zobrazujúci veľkosť amplitúd pre jednotlivé harmonické zložky. Z obr. 7 vyplýva, že pri meraní profilu je najvýraznejšou zložkou druhá harmonická, ktorá popisuje oválnosť súčiastky. Obdobne sa dajú z ďalších zložiek vyvodiť ďalšie vplyvy. Malé frekvencie harmonických zložiek sa spravidla vzťahujú k chybám nastavenia obrábacích strojov a upnutia súčiastok. Stredné frekvencie vznikajú chvením vyskytujúcim sa vo výrobnom procese a vyššie sa obvykle spájajú so stopami po nástroji.



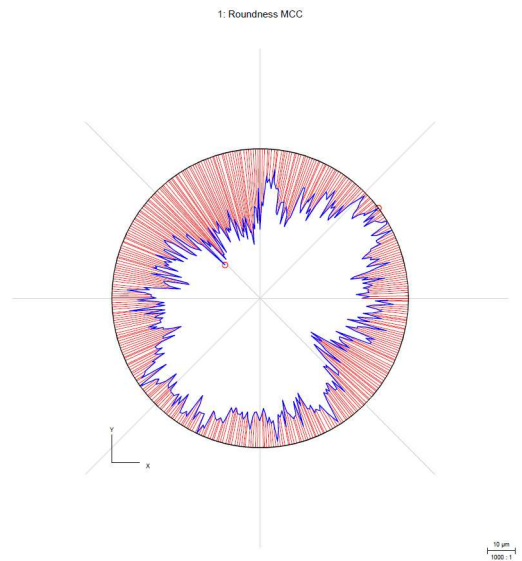
Obr. 6 Spôsoby vyhodnotenia odchýlky kruhovitosti

Filtrovaním a racionálnou úpravou vstupných hodnôt sme sa dostali k samotnému vyhodnoteniu odchýlky tvaru, v našom prípade kruhovitosti. Norma ISO 4291 predpisuje 4 metódy vyhodnotenia. Kruhovitost' je udávaná ako rozdiel medzi najväčším a najmenším polomerom meraného profilu, pričom meranie sa prevádza od akéhokoľvek z nasledujúcich stredov (obr. 6):

- stred najmenších štvorcov (LSC – least squares mean circle)
- stred najmenšieho pásma tvoreného medzikružím (MZC – minimum zone circles)
- stred najmenšej opísanej kružnice (MCC – minimum circumscribed circle)
- stred najväčšej vpísanej kružnice (MIC – maximum inscribed circle)



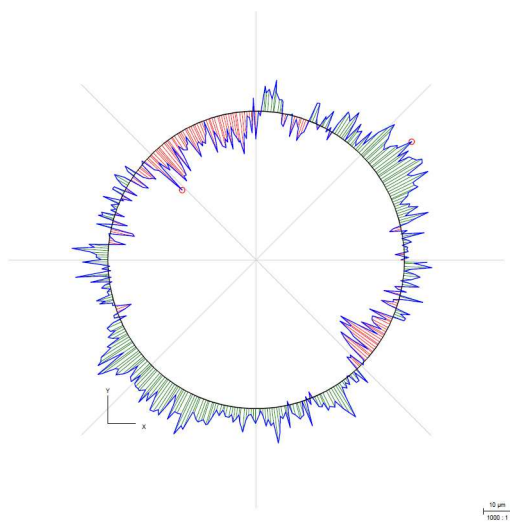
a)



b)

No	Identifier	Actual [mm]	Tol. [mm]	No. of Points	Speed [mm/s]	Probe Radius [mm]	F.Type	L.C.	UPR
1	Roundness MCC	0.0364	0.0000	399	2.50	0.0000			

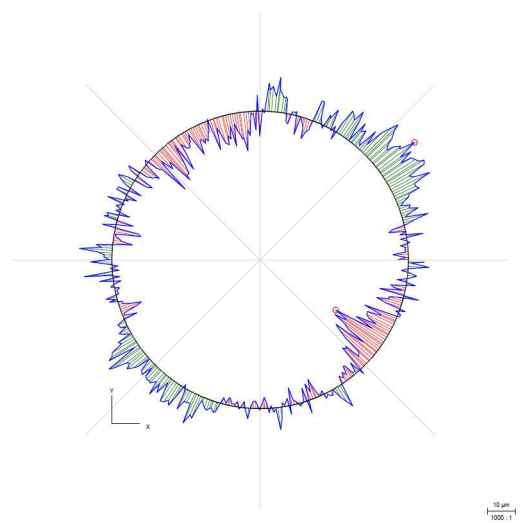
1: Roundness MZC



No	Identifier	Actual [mm]	Tol. [mm]	No. of Points	Speed [mm/s]	Probe Radius [mm]	F.Type	L.C.	UPR
1	Roundness MZC	0.0337	0.0000	399	2.50	0.0000			

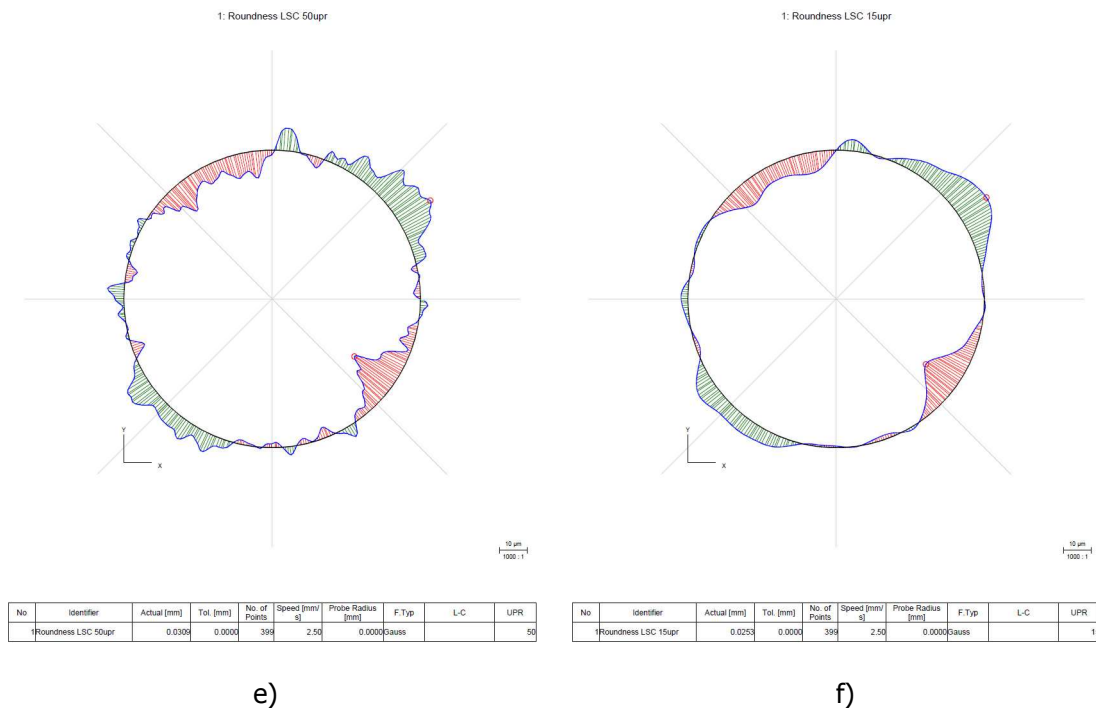
c)

1: Roundness LSC



No	Identifier	Actual [mm]	Tol. [mm]	No. of Points	Speed [mm/s]	Probe Radius [mm]	F.Type	L.C.	UPR
1	Roundness LSC	0.0372	0.0000	399	2.50	0.0000			

d)



Obr. 7 Metódy vyhodnotenia odchýlky kruhovitosti a) graf Rýchlej Fourierovej analýzy b) metóda MCC bez filtrovania c) metóda MZC bez filtrovania d) metóda LSC bez filtrovania e) metóda LSC s dolnopriepustným Gaussovým filtrom do 50 upr f) metóda LSC s dolnopriepustným Gaussovým filtrom do 15 upr

Pri vyhodnocovaní tvaru je nutné si uvedomiť, že reprezentatívny prvok, ktorý je preložený meraným profilom nie je závislý na menovitom rozmere elementu ale len na menovitom tvare (v našom prípade je to ideálna kružnica).

Výstupné polárne diagramy a hodnoty kruhovitosti stanovené rôznymi metódami na obr. 7 b) až f) sú získané po meraní vonkajšej valcovej plochy poddajnej kaučukovej súčiastky priemyselným tomografom Metrotom 1500, ktorý je súčasťou vybavenia Technologického centra počítačovej tomografie na Strojníckej fakulte Technickej univerzity v Košiciach.

Z vyhodnotení je zrejmé, že zvolené metódy stanovenia odchýlky kruhovitosti len v naznačených prípadoch variujú medzi hodnotami 25,3 µm až 37,2 µm. Voľba vhodnej metódy väčšinou závisí od použitia meranej súčiastky a hlavne od funkčných vlastností meraného elementu.

Obdobne sa postupuje pri vyhodnocovaní ostatných tvarových odchylov. Ako príklad môžeme uviesť priamost', kde rovnako existujú obalové aj stredné metódy pre stanovenie odchýlky priamosti.

Tento príspevok bol vypracovaný za podpory Grantovej agentúry MŠ SR pri riešení projektu VEGA 1/0022/10 "Príspevok k výskumu stratégií merania na súradnicových meracích strojoch".

Odkazy

- STN EN ISO 1101 „Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS). Geometrické tolerovanie. Tolerancie tvaru, orientácie, polohy a hádzania.“ August 2006
- STN ISO 4291 „Metódy hodnotenia odchylov kruhovitosti. Meranie zmien polomeru.“ Február 1995
- <http://www.tuke.sk/smetrologia>