

Geometrické tolerancie a ich predpis sú popísané v norme STN EN ISO 1101 z roku 2006 [46], ktorá v celom rozsahu nahrádza predošlé normy STN 01 4401 a STN 01 3137 z roku 1981.

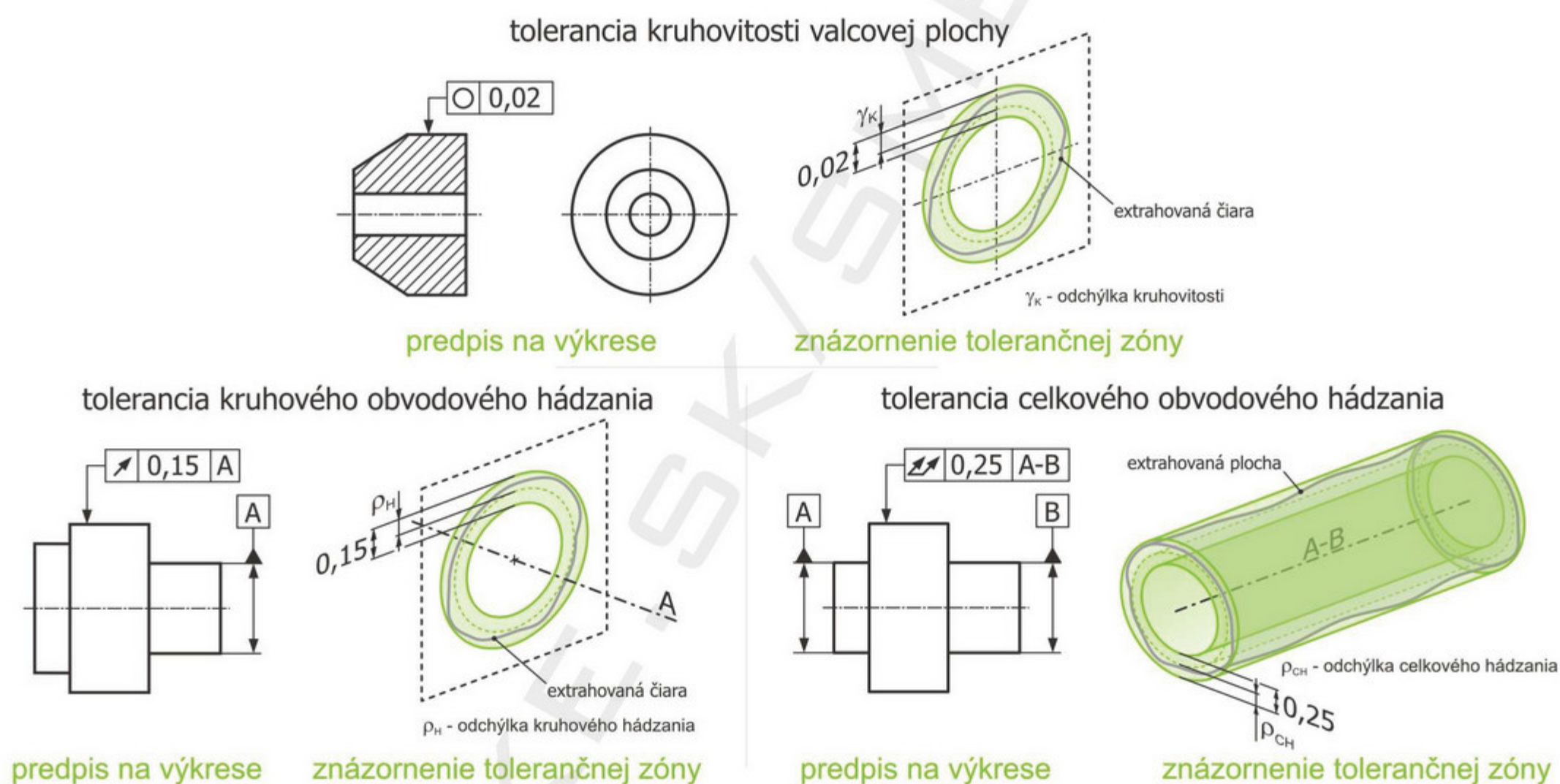
Geometrické tolerancie sa podľa tejto normy delia do štyroch kategórií: tvaru, orientácie, polohy a hádzania. Všeobecné informácie o geometrických toleranciách obsahuje teória pre úlohu č.7.

### Tolerovanie kruhovitosti a hádzania

Tolerancia kruhovitosti patrí do skupiny tolerancií tvaru. Tolerančná zóna pri kruhovitosti je v uvažovanom priereze ohraničená dvoma sústrednými kružnicami, ktorých radiálna vzdialenosť je rovná predpísanej hodnote tolerancie. Skutočná (extrahovaná) čiara v ľubovoľnom priereze valcových alebo kužeľových povrchov sa musí nachádzať medzi týmito dvoma koplanárnymi (ležiacimi v jednej rovine) sústrednými kružnicami (obr.9.1).

Tolerancie hádzania sú rozdelené do dvoch podskupín: **kruhové** a **celkové**. Podľa toho, pre ako orientovanú plochu sa tolerancia hádzania predpisuje, je možné rozlišovať tolerancie hádzania obvodového (radiálneho), čelného (axiálneho), v ľubovoľnom smere alebo v danom smere (Obr.9.1).

Pri tolerancii kruhového obvodového hádzania je tolerančná zóna v ľubovoľnom priereze kolmom na os základne ohraničená dvoma sústrednými kružnicami, ktorých radiálna vzdialenosť je rovná hodnote tolerancie a stredy týchto kružníc sú totožné so základňou.



Obr.9.1 Príklady tolerovania kruhovitosti, kruhového a celkového hádzania

### Vyhodnocovanie odchýlok kruhovitosti

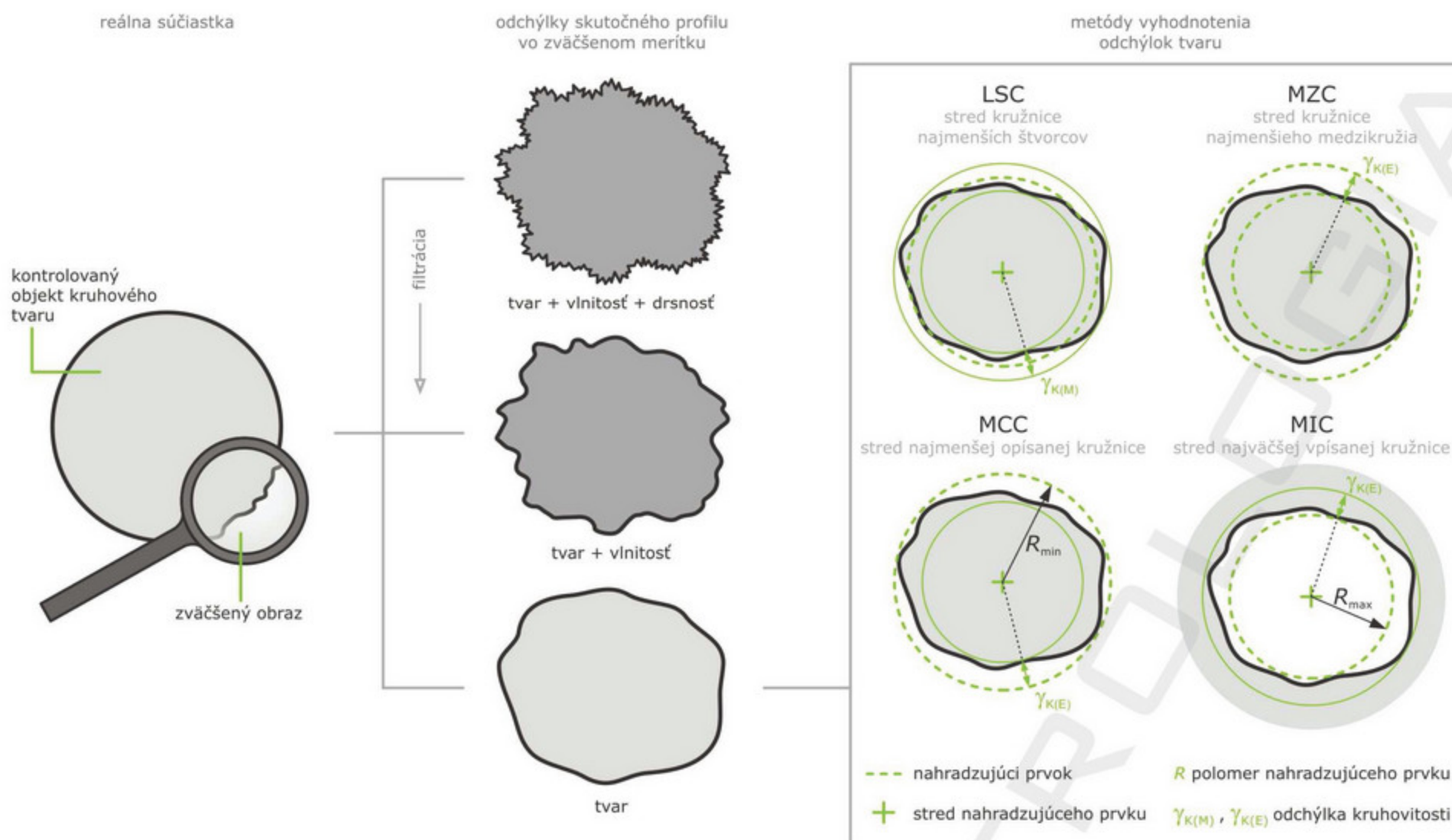
K vyhodnoteniu odchýlok tvaru, teda aj kruhovitosti, potrebujeme dva porovnateľné prvky. Porovnáva sa skutočný prvok (pri meraní sa za skutočný prvok považuje nasnímaný profil s odfiltrovanou zložkou drsnosti a vlnitosti) a prvok ideálneho geometrického tvaru (v tomto prípade kružnica). Najväčší rozdiel medzi týmito prvkami sa hodnotí ako odchýlka kruhovitosti.

Norma STN ISO 4291 z roku 1995 [47] popisuje odchýlku kruhovitosti ako rozdiel medzi najväčším  $R_{max}$  a najmenším  $R_{min}$  polomerom meraného profilu súčasti, pričom sa meranie môže prevádzať od akéhokoľvek z nasledujúcich stredov (Obr.9.2)

- stred kružnice najmenších štvorcov (LSC – Least Squares mean Circle),
- stred kružnice najmenšieho pásma (medzikružia) (MZC – Minimum Zone Circles),
- stred najmenšej opísanej kružnice (MCC – Minimum Circumscribed Circle) pri vonkajšom povrchu,
- stred najväčšej vpísanej kružnice (MIC – Maximum Inscribed Circle) pri vnútornom povrchu.

Metódam MZC, MCC a MIC sa vracia tiež obalové alebo E systémy vyhodnocovania. Metóda LSC sa uvádza aj pod pojmom stredná alebo M systém vyhodnocovania.





Obr.9.2 Metódy vyhodnocovania odchýlok kruhovitosti

Meranie odchýlok kruhovitosti je možné vykonávať viacerými metódami. Kruhovitost' sa najčastejšie kontroluje špeciálnymi dotykovými prístrojmi kde, okolo pevne upnutej súčiastky rotuje merací dotyk (napr. pri súradnicovej meracej technike) alebo inverzne, súčiastka sa otáča okolo rotačnej osi a odchýlky sú priebežne snímané odchýlkomerom. Pri otáčaní súčiastky kruhového tvaru sa postupne indikujú všetky nerovnosti v určitom reze. Ak je bodov dostatočné množstvo, je možné profil povrchu nahradiť radou sínusoid, ktorých frekvencia sa vyjadruje počtom vln na otáčku UPR (Undulation Per Revolution). Sínusoidy s veľkou frekvenciou (t.j. krátkou periódou) reprezentujú **drsnosť** povrchu, so strednou **vlnitosť** a s malou **tvar** profilu. Všetky harmonické zložky spolu tvoria tzv. primárny profil.

Vhodne zvoleným dotyk (napr. s veľkým priemerom guľičky) je možné eliminovať zložku drsnosti. Dotyk snímača vtedy slúži ako tzv. mechanický filter. Ostatné harmonické zložky je pre stanovenie odchýlok tvaru nutné eliminovať iným spôsobom filtrácie.

Hodnoty nameraných odchýlok sa najčastejšie zapisujú v polárnych súradniciach, aby bolo možné jednoducho vytvoriť nahradzujúci prvok (obalovú alebo strednú kružnicu) a pomocou jeho stredy vyhodnotiť odchýlku kruhovitosti. Takýmto zápisom vravíme polárne diagramy (Obr.9.3 a Obr.9.9).

V dielenskej praxi sa pre rýchle stanovenie odchýlok kruhovitosti využívajú aj iné metódy kontroly. Najjednoduchšou je metóda dvojbodová. Často sa takto kontrolujú hriadele tzv. obkročným spôsobom napríklad strmeňovým mikrometrom. Dvojbodové meranie je v podstate meranie priemerov súčiastky po jej obvode. Odporúča sa väčšinou pri meraní profilov, ktorých tvar sa blíži elipse. Odchýlka kruhovitosti v tomto prípade odpovedá polovici meranej hodnoty, ktorej sa vraví odchýlka ovality. Ďalšou metódou je trojbodová metóda, pri ktorej je najčastejšie kontrolovaná súčiastka položená na prizmatickej podložke a zmeny jej polomeru pri otáčaní sa merajú odchýlkomerom zhora. Odchýlka kruhovitosti je matematicky závislá od meranej odchýlky. Tieto metódy sú však oproti prvej spomínanej málo presné a slúžia väčšinou len ako informatívne meranie.

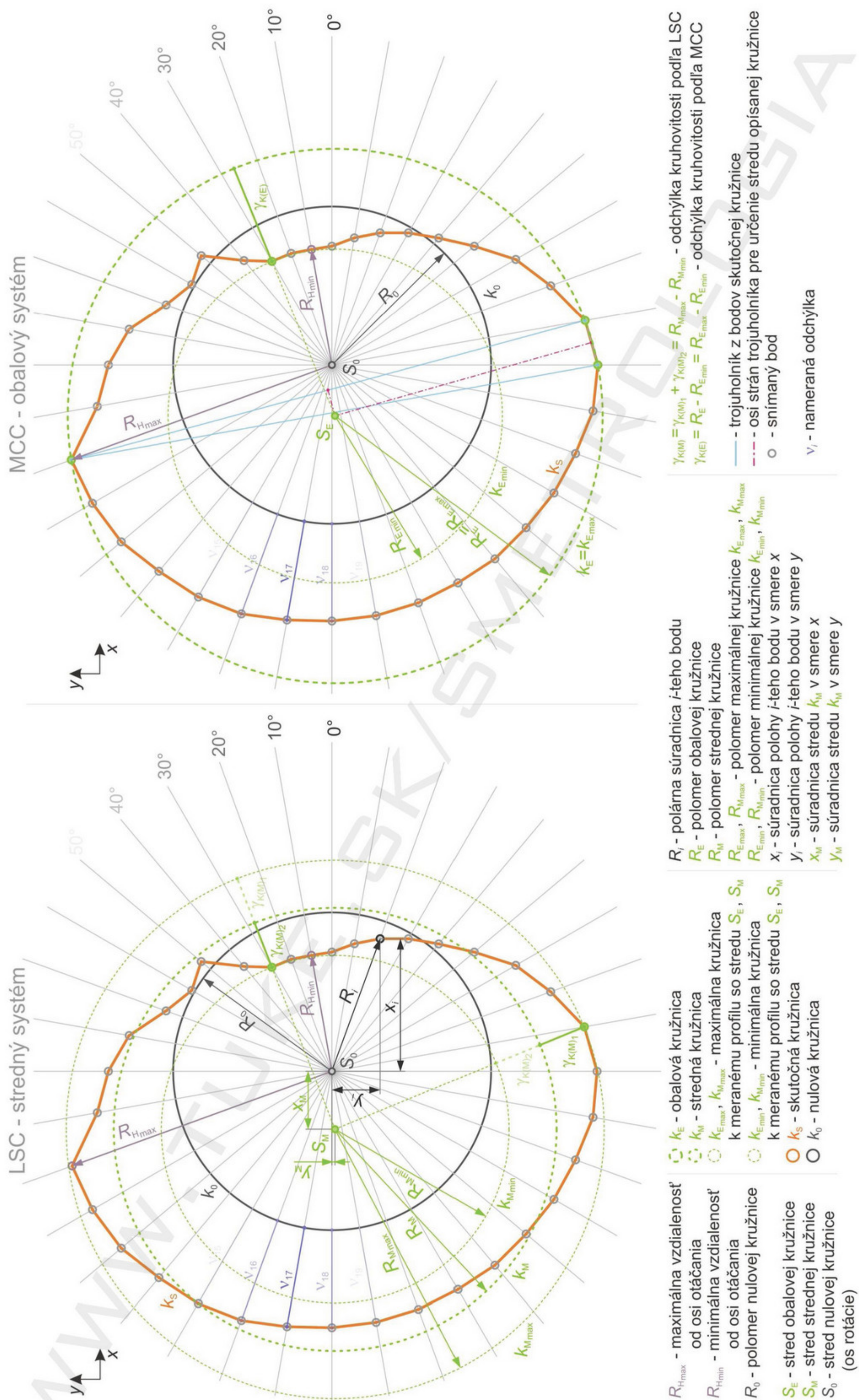
### Vyhodnocovanie odchýlok hádzania

Odchýlky hádzania sú komplexné odchýlky, ktoré v sebe zahŕňajú často aj ďalšie závislé odchýlky ako súosovosť, kolmosť, kruhovitosť atď. Norma STN ISO EN 1101 popisujúca geometrické tolerancie delí hádzanie do dvoch hlavných skupín: kruhové a celkové. Určuje, či je predpísaná tolerancia na kruhový výsek alebo na plochu. Namerané odchýlky musia ležať v predpísanej tolerancii, aby z hľadiska hádzania súčiastka vyhovovala.

Odchýlky hádzania či už kruhového alebo celkového je možné merať buď na obvode súčiastky (vtedy hovoríme o kontrole obvodového alebo radiálneho hádzania), na čele rotujúcej súčiastky (hovoríme o kontrole čelného alebo axiálneho hádzania) alebo pri kuželových, guľových či tvarovo zložitých súčiastkach je možné kontrolovať aj v kolmom smere na plochu či v ľubovoľnom smere určenom predpisom na výkrese.

Pri meraní hádzania sa kontrolované súčiastky najčastejšie upínajú buď medzi hroty alebo sa kontrolujú priamo v aplikácii (napríklad pri kontrole hádzania vretena sústruhu). Pri kruhovom hádzaní sa určuje rozdiel medzi najväčšou a najmenšou nameranou odchýlkou počas rotácie súčiastky. Celkové hádzanie popisuje rozdiel medzi najväčšou a najmenšou odchýlkou v rámci celej kontrolovanej plochy.





Obr.9.3 Polárny diagram

- $R_{Hmax}$  - maximálna vzdialenosť od osi otáčania
- $R_{Hmin}$  - minimálna vzdialenosť od osi otáčania
- $R_0$  - polomer nulovej kružnice
- $S_E$  - stred obalovej kružnice
- $S_M$  - stred strednej kružnice
- $S_0$  - stred nulovej kružnice (os rotácie)
- $k_E$  - obalová kružnica
- $k_M$  - stredná kružnica
- $k_{Emax}, k_{Mmax}$  - maximálna kružnica k meranému profilu so stredom  $S_E, S_M$
- $k_{Emin}, k_{Mmin}$  - minimálna kružnica k meranému profilu so stredom  $S_E, S_M$
- $k_S$  - skutočná kružnica
- $k_0$  - nulová kružnica
- $R_{Hmax} + \gamma_{K(M)1} = R_{Mmax} - R_{Mmin}$  - odchýlka kruhovitosti podľa LSC
- $\gamma_{K(E)} = R_E - R_{Emin} = R_{Emax} - R_{Emin}$  - odchýlka kruhovitosti podľa MCC
- trojuholník z bodov skutočnej kružnice
- - - osi strán trojuholníka pre určenie stredy opisanej kružnice
- o - snímaný bod
- $V_i$  - nameraná odchýlka
- $R_i$  - polárna súradnica  $i$ -teho bodu
- $R_E$  - polomer obalovej kružnice
- $R_M$  - polomer strednej kružnice
- $R_{Emax}, R_{Mmax}$  - polomer maximálnej kružnice  $k_{Emax}, k_{Mmax}$
- $R_{Emin}, R_{Mmin}$  - polomer minimálnej kružnice  $k_{Emin}, k_{Mmin}$
- $x_i$  - súradnica polohy  $i$ -teho bodu v smere  $x$
- $y_i$  - súradnica polohy  $i$ -teho bodu v smere  $y$
- $x_M$  - súradnica stredy  $k_M$  v smere  $x$
- $y_M$  - súradnica stredy  $k_M$  v smere  $y$



## ÚLOHA Č.9

### MERANIE ODCHÝLOK KRUHOVITOSTI A RADIÁLNEHO HÁDZANIA

#### Meranie kruhovitosti a radiálneho hádzania

Medzi najjednoduchšie spôsoby kontroly kruhovitosti patrí tzv. dvojbodová metóda, ktorou sa merajú priemery súčiastky v danom reze (Obr.9.4). Po nameraní prvej hodnoty priemeru  $D_x$  sa pootočením súčiastky o  $90^\circ$  meria druhá hodnota priemeru  $D_y$ . Meranie sa niekoľkokrát zopakuje, vyhodnotia sa rozdiely medzi priemermi meranými v kolmých smeroch a získava sa hodnota odchýlky oválnosti

$$v_{oi} = |D_{xi} - D_{yi}| \quad (9.1)$$

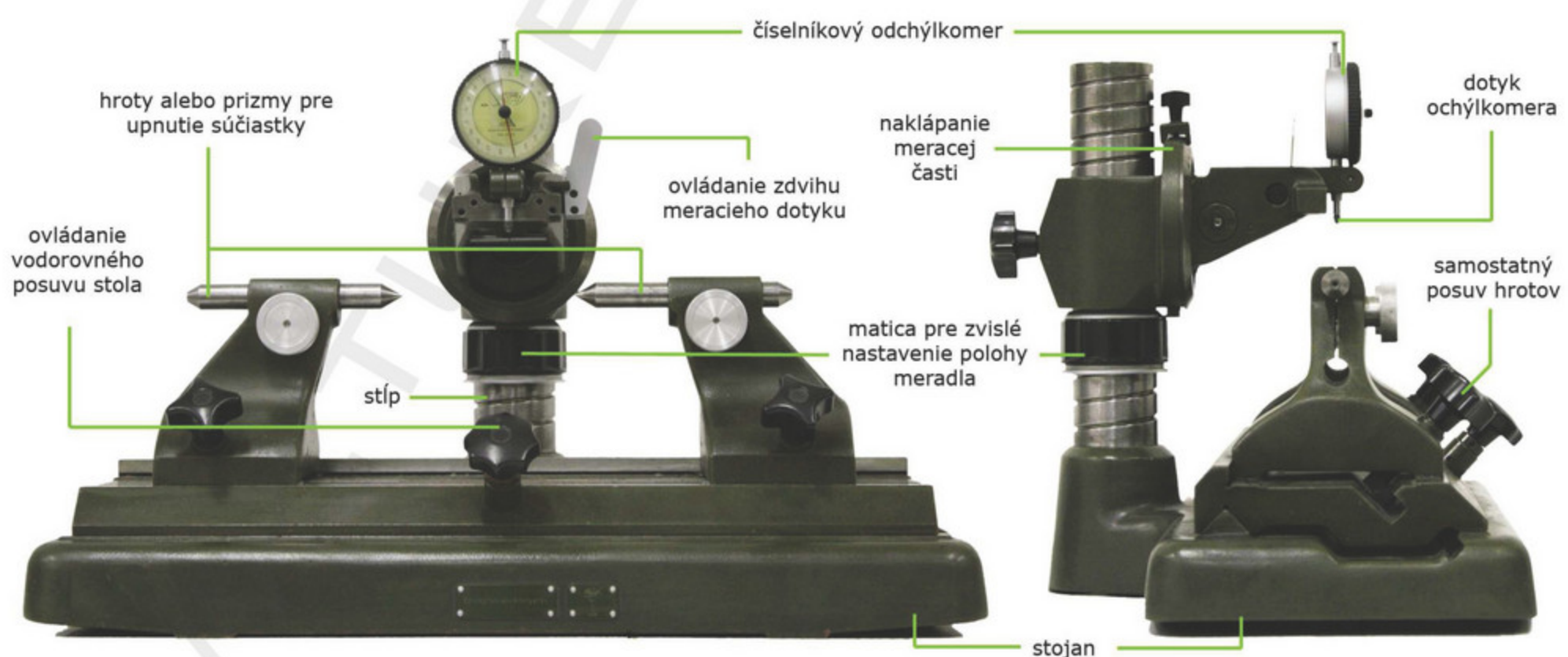
Odchýlka kruhovitosti je potom definovaná ako polovičná hodnota maximálnej z nameraných odchýlok

$$\gamma_k = \frac{\max\{v_{oi}\}}{2} \quad (9.2)$$



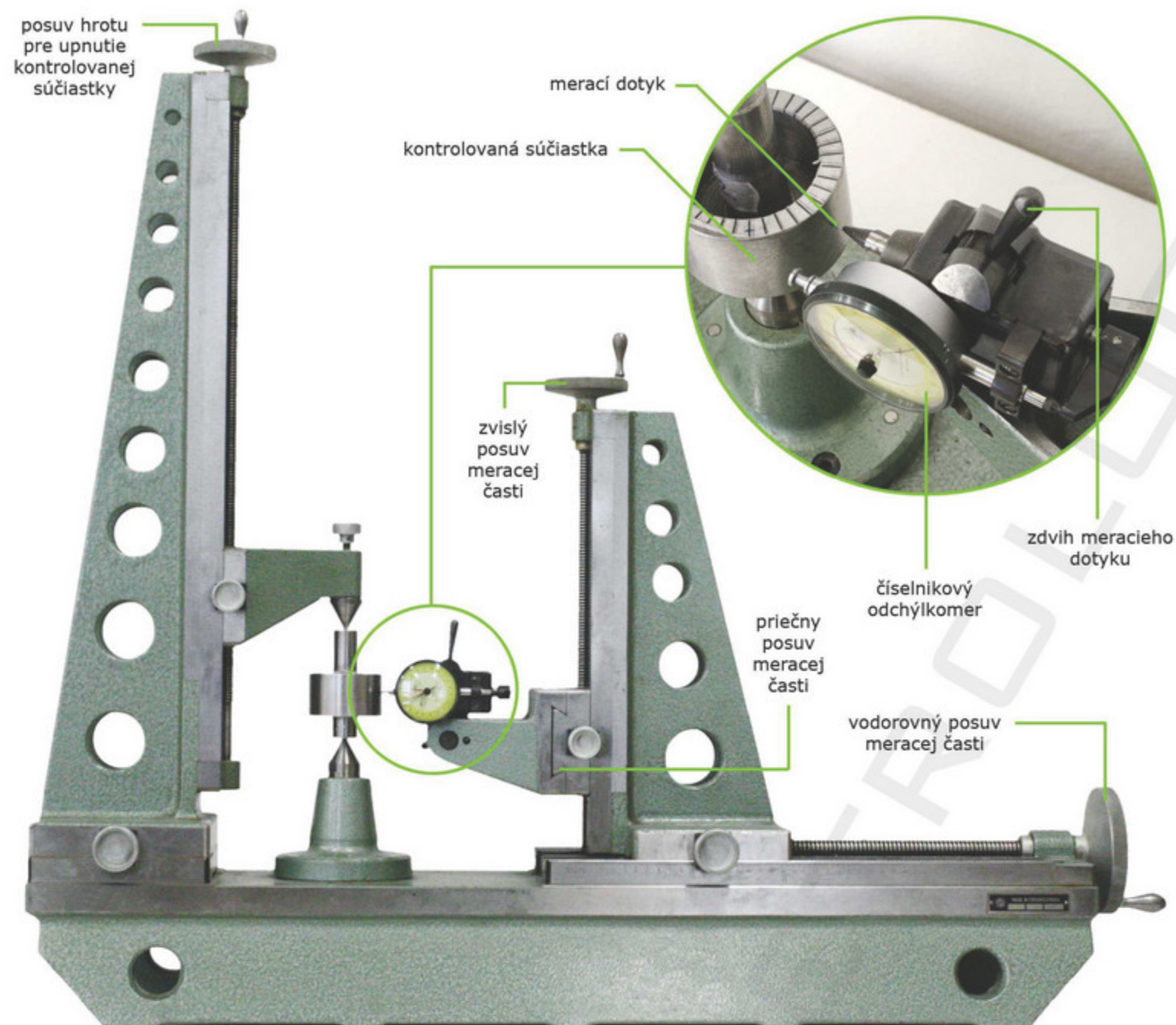
Obr.9.4 Meranie a schéma merania kruhovitosti dvojbodovou metódou

Kontrola kruhovitosti radiálnou metódou je možná napríklad na prístrojoch z Obr.9.5 a Obr.9.6. Využíva sa rovnaká metóda merania, rozdiel je len v konštrukčnom usporiadaní týchto meradiel. Pri vodorovnom prevedení (Obr.9.5) je možné kontrolovanú súčiastku upnúť medzi hroty (využitie strediacich otvorov) alebo uložiť na prizmy (využitie valcových plôch) a polohuje sa súčiastka. Pri zvislom prevedení (Obr.9.6) sa súčiastka upína medzi hroty a do daného rezu sa polohuje meracia časť. Oba prístroje indikujú hodnoty pomocou číselníkového odchýlkomera s rozlíšením 0,001 mm. Schémy merania vid' Obr.9.7.



Obr.9.5 Zariadenie na meranie kruhovitosti a hádzania





Obr.9.6 Zariadenie na meranie kruhovitosti a hádzania rotačných súčiastok a ozubených kolies

Dotyk odchýlkomera sa nastaví na kontakt s kontrolovanou súčiastkou v danom reze. Počas rotácie sa v polohách daných zvoleným krokom odčítavajú hodnoty odchylok povrchových bodov. Zaznamenané hodnoty sa zakresľujú do polárneho diagramu (Obr.9.3). Namerané odchýlky sa nanášajú od vhodne zvolenej nulovej kružnice v smere danom uhlom pootočenia. Z diagramu sa graficky vyhodnotí odchýlka kruhovitosti jednou zo zvolených metód.

#### Obalová metóda MCC

Prvým krokom k určeniu obalovej kružnice je stanovenie stredu kružnice  $S_E$ . Jednou z metód pre určenie stredu z polárneho diagramu je definovanie vhodného trojuholníka z bodov nameraného profilu. Priesečník osí jednotlivých strán trojuholníka určuje stred opísanej kružnice trojuholníka, čo pri správnej voľbe bodov určí aj stred obalovej kružnice meraného profilu. Odchýlka kruhovitosti  $\gamma_{K(E)}$  z polárneho diagramu je maximálna vzdialenosť obalovej kružnice od skutočnej meraná v radiálnom smere obalovej kružnice, alebo tiež rozdiel polomerov maximálnej a minimálnej kružnice k meranému profilu so stredom  $S_E$  (Obr.9.3).

#### Stredná metóda LSC

Pre výpočet stredu strednej kružnice sa výpočtom určia polárne a kartézske súradnice každého z nameraných bodov.

Pre polárnu súradnicu  $i$ -teho bodu platí

$$R_i = R_0 + v_i \quad (9.3)$$

kde  $R_0$  je polomer zvolenej nulovej kružnice,  
 $v_i$  je nameraná odchýlka.

Pre kartézske súradnice polohy  $i$ -teho bodu platí

$$x_i = R_i \cdot \cos \varphi_i \quad (9.4)$$

$$y_i = R_i \cdot \sin \varphi_i \quad (9.5)$$

kde  $x_i$  je súradnica polohy  $i$ -teho bodu v smere osi  $x$ ,  
 $y_i$  je súradnica polohy  $i$ -teho bodu v smere osi  $y$ ,  
 $\varphi_i$  je uhol pootočenia  $i$ -teho bodu okolo stredu rotácie od osi  $x$ .



Pre kartézské súradnice stredu strednej kružnice platí

$$x_M = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9.6)$$

$$y_M = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (9.7)$$

Pre polomer strednej kružnice platí

$$R_M = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \quad (9.8)$$

kde  $n$  je počet meraných bodov profilu.

Kruhovú radiálnu hádzanosť obvodovej plochy súčiastky sa určí tak, že pri rotácii súčiastky o  $360^\circ$  sa zisťujú maximálna hodnota odchýlky  $v_{max}$  a minimálna hodnota odchýlky  $v_{min}$ , ktoré sú indikované číselníkovým odchýlkomerom (Obr.9.7). Rozdiel medzi týmito hodnotami sa uvádza ako odchýlka kruhového hádzania a platí

$$\rho_H = v_{max} - v_{min} \quad (9.9)$$

kde  $v_{max}$  je maximálna nameraná odchýlka od osi otáčania v danom reze,

$v_{min}$  je minimálna nameraná odchýlka od osi otáčania v danom reze.

Celkové radiálne hádzanie sa kontroluje vo viacerých prierezoch (Obr.9.7). Určí sa ako rozdiel medzi maximálnou z maximálnych odchylok a minimálnou z minimálnych odchylok indikovaných počas rotácie súčiastky okolo osi otáčania. Určuje sa teda zo vzťahu

$$\rho_{CH} = \max\{v_{max\ i}\} - \min\{v_{min\ i}\} \quad (9.10)$$

kde  $v_{max\ i}$  je maximálna nameraná odchýlka od osi otáčania v  $i$ -tom reze,

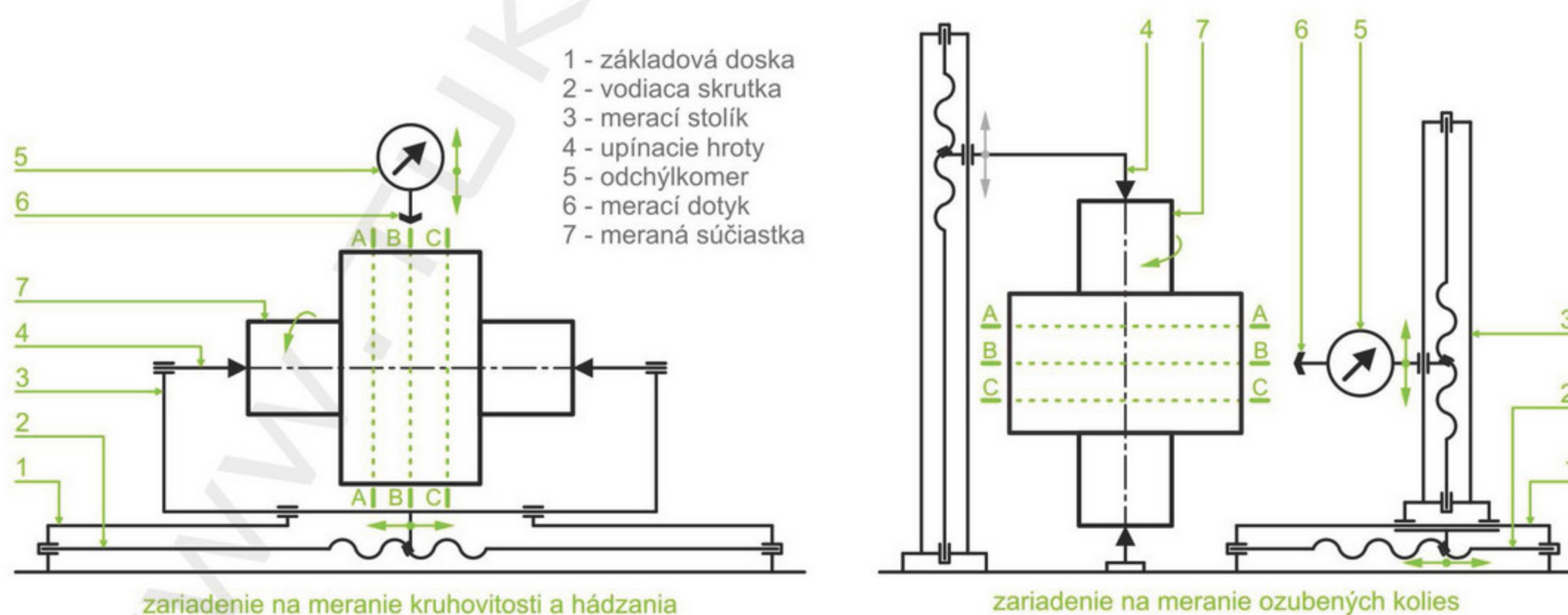
$v_{min\ i}$  je minimálna nameraná odchýlka od osi otáčania v  $i$ -tom reze.

Kruhovú radiálnu hádzanosť sa dá vyhodnotiť aj z polárneho diagramu ako rozdiel medzi maximálne vzdialeným bodom a minimálne vzdialeným bodom od osi rotácie a platí

$$\rho_{HG} = R_{Hmax} - R_{Hmin} \quad (9.11)$$

kde  $R_{Hmax}$  je maximálna vzdialenosť nameraného bodu od osi otáčania,

$R_{Hmin}$  je minimálna vzdialenosť nameraného bodu od osi otáčania.



Obr.9.7 Schémy merania pre radiálnu metódu



## Moderný spôsob vyhodnocovania kruhovitosti a hádzania

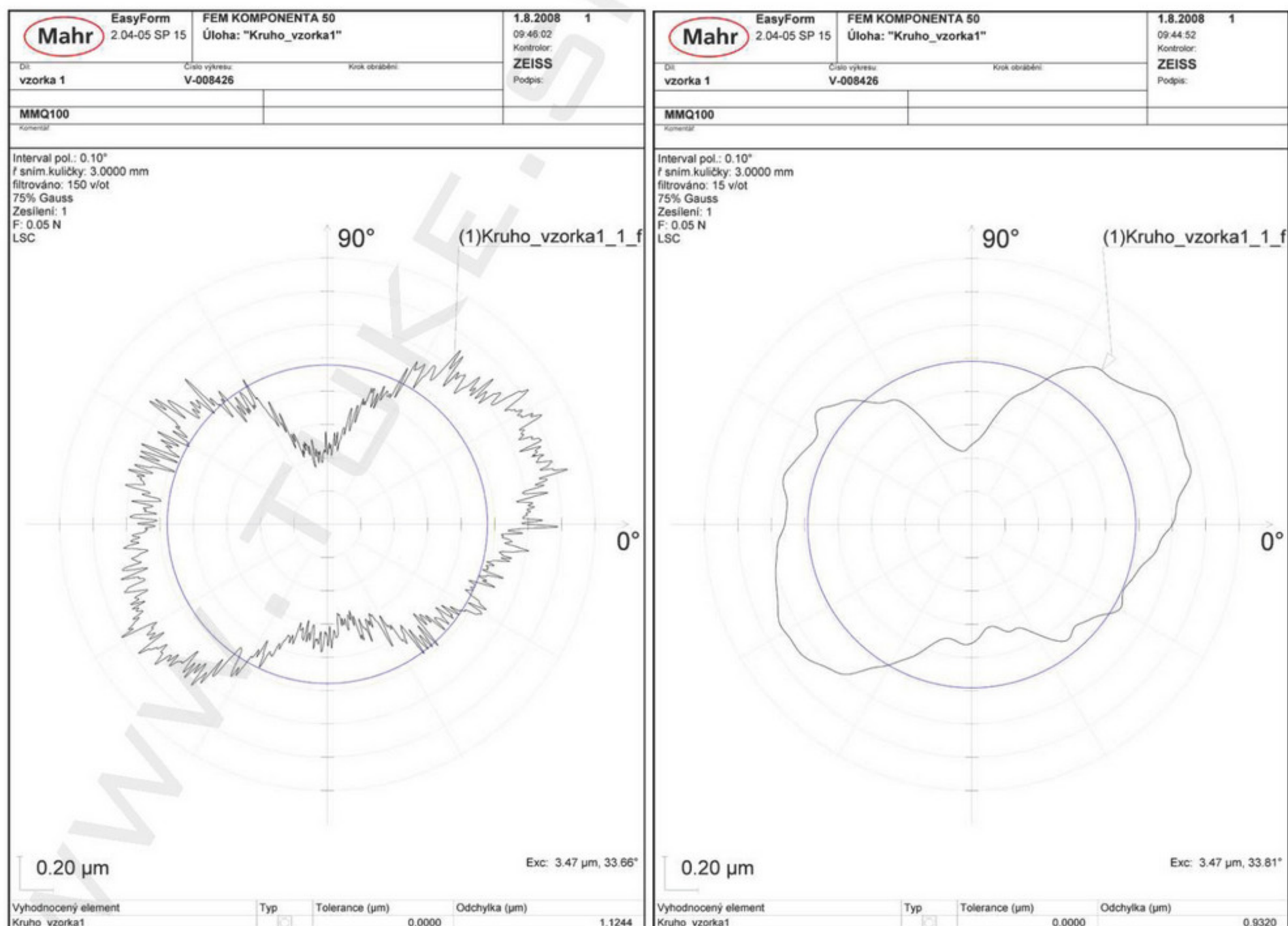
V dnešnej praxi sa na vyhodnocovanie odchýlok kruhovitosti i hádzania používajú okrem súradnicovej meracej techniky aj špecializované prístroje nazývané aj kruhomery alebo formtestre (Obr.9.8), ktoré prepojením s počítačovou stanicou ponúkajú široké možnosti rýchleho vyhodnocovania kvality povrchu. Dokážu rýchlo filtrovať primárny profil ľubovoľnými hornopriepustnými alebo dolnopriepustnými filtermi. Pre vyhodnotenie tvaru ponúkajú všetky normou stanovené metódy (MIC, MCC, MZC a LSC) a ponúkajú tiež možnosť vyhodnotiť zastúpenie harmonických zložiek profilu rýchlou fourierovou transformáciou (FFT - Fast Fourier Transformation). Pomocou tejto analýzy je možné určiť napr. vplyvy nepresností z výrobného procesu. Malé frekvencie harmonických zložiek sa spravidla vzťahujú k chybám nastavenia obrábacích strojov. Stredné frekvencie vznikajú chvením vyskytujúcim sa vo výrobnom procese a vyššie sa obvykle spájajú so stopami po nástroji.

Na Obr.9.9 sú zobrazené ukážky výstupných protokolov jednej vyhodnovennej súčiastky. V oboch prípadoch je použitá metóda LSC, pri ktorej je nameraným profilom preložená stredná kružnica (modrá). Rozdiel medzi protokolmi je v tom, že ľavý zobrazuje profil s filtrom 150 vln na otáčku (150 UPR) a pravý s 15 vlnami na otáčku (15 UPR).

Tento prístroj je možné použiť aj na vyhodnotenie ďalších odchýlok rotačných súčiastok ako valcovitosť, súosovosť, priamosť osí, kruhové či celkové hádzanie atď.



Obr.9.8 Formtester MMQ 100 firmy Mahr



Obr.9.9 Výstupné protokoly z merania na formtestri MMQ 100