

## Kalibrácia geodetických prístrojov

Ján Ježko<sup>1</sup> a Marek Bajtala<sup>2</sup>

### Calibration of Geodetic Instruments

*The problem of metrology and security systems of unification, correctness and standard reproducibilities belong to the preferred requirements of theory and technical practice in geodesy. Requirements on the control and verification of measured instruments and equipments increase and the importance and up-to-date of calibration get into the foreground. Calibration possibilities of length-scales (of electronic rangefinders) and angle-scales (of horizontal circles) of geodetic instruments. Calibration of electronic rangefinders on the linear comparative baseline in terrain. Primary standard of planar angle – optical traverse and its exploitation for calibration of the horizontal circles of theodolites. The calibration equipment of the Institute of Slovak Metrology in Bratislava. The Calibration process and results from the calibration of horizontal circles of selected geodetic instruments.*

**Key words:** Calibration, electronic rangefinder, linear comparative baseline, primary standard of planar angle, optical traverse, horizontal circle of theodolite, autocollimator.

### Úvod

Kvalitná meracia technika je jedným zo základných prvkov procesu merania. Musí spĺňať požadované kritériá presnosti garantované výrobcom, prípadne príslušným overovacím certifikátom. Rozvoj súkromného sektora, uvádzanie nových i používanie starších prístrojov v meračskej praxi, zvyšuje požiadavky na udržanie vysokej kvality geodetických prác. Toto samozrejme priamo súvisí s požiadavkou na používanie overených a kalibrovaných geodetických prístrojov.

Dôležitosť tejto otázky rastie i v súvislosti s integráciou Slovenska do Európskej únie, ktorá vytvorila predpoklady pre účasť našich geodetov na zahraničných projektoch, kde je používanie overených a kalibrovaných geodetických prístrojov samozrejmosťou.

### Overenie a kalibrácia - základná metrologická činnosť

Overenie je súhrn úkonov, ktorých cieľom je zistiť a potvrdiť, že meradlo zodpovedá predpísaným požiadavkám. Výsledkom overenia je konštatovanie, či dané meradlo požiadavky spĺňa, alebo nie (Brezina, 2001), (STN, 2001).

Kalibrácia je definovaná ako „súbor operácií, ktoré pri definovaných podmienkach určujú vzťahy medzi hodnotami indikovanými meradlom alebo meracím systémom, alebo hodnotami reprezentovanými materializovanou mierou alebo referenčným materiálom a zodpovedajúcimi hodnotami veličín, ktoré sú realizované etalónmi“ (Brezina, 2001), (STN, 2001).

Kalibrácia je základnou metrologickou činnosťou, je špecifickým druhom merania s použitím etalónov. Bez použitia kalibrovaných meradiel nie je možné zabezpečiť kvalitu vo výrobe, ani dôveryhodnosť výsledkov meraní. Pri súčasnom rozvoji integrovaných meracích prístrojov (IMP) v geodézii sa ukazuje potreba nevyhnutne venovať zvýšenú a pravidelnú pozornosť testovaniu a kalibrácii IMP, ako neoddeliteľných súčastí merania.

Etalón je zhmotnená miera, merací prístroj, referenčný materiál alebo merací systém určený na definovanie, realizáciu, uchovanie a reprodukciu jednotky jednej alebo viacerých hodnôt veličiny (Brezina, 2001), (STN, 2001).

### Dĺžkové základnice – geodetický etalón v teréne

Požiadavky na presné dĺžkové merania, ich opakovanie, potreba overovania presnosti a kvality elektronických diaľkometerov i ich narastajúci počet v geodetickej praxi viedli hlavne v minulých desaťročiach k budovaniu geodetických porovnávacích základníc (GPZ) v teréne (Ježko, 2001). V tab.1 sú uvedené geodetické základnice vybudované u našich najbližších susedov, vrátane našej základnice v Hlohovci.

Pre úplnosť treba uviesť, že dĺžkové základnice v Maďarsku (Gödöllő) a v Poľsku (Bemowo) boli vybudované pomocou Väisäläho interferenčnej metódy a tie ďalšie s využitím presných elektronických diaľkometerov.

<sup>1</sup> Ing. Ján Ježko, PhD., Katedra geodézie, SvF STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel.: 421 02 59274 338, [jan.jezko@stuba.sk](mailto:jan.jezko@stuba.sk)

<sup>2</sup> Ing. Marek Bajtala, Katedra geodézie, SvF STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel.: ++421 02 59274 392, [marek.bajtala@stuba.sk](mailto:marek.bajtala@stuba.sk)  
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 11. 4. 2005)

Rok vybudovania	Štát - mesto	Dĺžka základnice
1978	SR - Hlohovec	960 m
1987	Poľsko - Bemowo	768 m
1987	Maďarsko - Gödöllő	864 m
1982	Rakúsko - Graz	1080 m
1985	ČR - Košnice	1450 m
1977	ČR - Praha (Hvězda)	

Väisäläho interferenčná metóda je z hľadiska presnosti merania v terénnych podmienkach metóda ešte neprekonaná. Vysoká presnosť tejto metódy je však podmienená mnohými technickými predpokladmi špeciálne piliere len pre Väisäläho interferometer, dôkladný geologický prieskum vybranej lokality, špeciálne pomôcky a zariadenia na stabilizáciu zrkadiel a interferometer (obr. 1, a-c), špeciálne pomôcky a zariadenia na určovanie atmosférických podmienok a v neposlednom rade s tým súvisiacia potreba značných finančných prostriedkov (Ježko, 2001).



Obr. 1a. Stabilizačné zariadenie pre Väisäläho interferometer  
Fig. 1a. Stability equipment for Väisälä interferometer



Obr. 1b. Stabilizácia bodov základnice  
Fig. 1b. Stabilization of baseline points



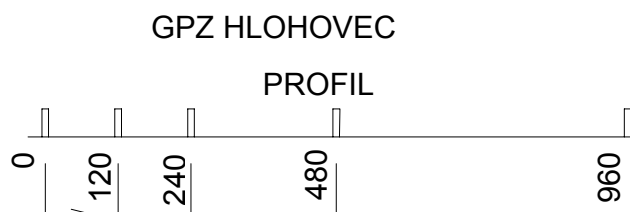
Obr. 1c. Podzemná stabilizácia  
Fig. 1c. Underground stabilization

### Dĺžková základnica Hlohovec a jej využitie na kalibráciu elektronických diaľkomerov

Výrobcovia elektronických diaľkomerov najčastejšie charakterizujú presnosť jednotlivých prístrojov smerodajnou odchýlkou meranej dĺžky  $d$  (Mičuda et. al., 2001) v tvare:

$$\sigma_d = a + b \cdot ppm, \quad (1)$$

kde  $a$  predstavuje adičný člen a  $b$  násobný člen. Tieto parametre udávané výrobcom sú získavané najčastejšie spracovaním mnohonásobných meraní v laboratórnych podmienkach. Možnosť overiť tieto parametre v terénnych podmienkach je kalibrácia na dĺžkovej základnici v Hlohovci. Podrobnosti o tejto základnici boli v odbornej literatúre už viackrát publikované (Bučko et. al., 2001). Pre kalibráciu sa využíva 5 pilierov s nútenou centráciou, označených Z1 – Z5 (obr. 2). Toto usporiadanie umožňuje odmerať na kalibráciu desať kombinácií dĺžok. Úplné kalibračné meranie sa odporúča vykonať v dvoch sériách (séria predstavuje obojstranné zmeranie dĺžok vo všetkých kombináciách) počas dvoch dní, podľa možnosti za rôznych poveternostných podmienok (Mičuda et. al., 2001).



Obr. 2. Dĺžková základnica Hlohovec  
Fig. 2. Linear baseline in Hlohovec

Spracovanie nameraných údajov na dĺžkovej základnici pozostáva (Mičuda et. al., 2001):

- z určenia fyzikálnej redukcie,
- z aplikácie matematickej korekcie,
- z odhadu adičnej konštanty,
- z odhadu parametrov regresnej priamky a ich charakteristík presnosti.

Výsledkom spracovania nameraných údajov je určenie hodnôt vybraných parametrov, určenie intervalu spoľahlivosti a testovanie hypotéz o vybraných parametroch. Adičná konštantu sa odhadne podľa druhého lineárneho modelu (nepriame meranie vektorového parametra) a platí pre kalibrovanú súpravu diaľkomer - odrazový systém. Odhadnuté dĺžky, charakterizované kovariančnou maticou sú opravené o adičnú konštantu a je ich možné priamo porovnať s parametrami základnice. Lineárnou regresiou s uvažovaním štatistických vlastností odhadnutých dĺžok sa potom odhadujú vybrané parametre diaľkomera (adičný člen  $a$  + násobný člen  $b$ ).

Parametre regresnej priamky dávajú základné informácie o kvalite merania dĺžok a tvoria zároveň kalibračnú rovnicu platiacu pre podmienky v čase realizácie kalibračných meraní a pre dĺžky v rozsahu ktorých bolo meranie vykonané (Mičuda et. al., 2001).

### Overenie a kalibrácia horizontálnych kruhov geodetických prístrojov

Overenie kvality delených kruhov geodetických prístrojov je menej časté ako overenie stupníc u iných meradiel, napr. dĺžkových. Príčin je niekoľko: vysoká presnosť pri ich výrobe (nanášani čiarových masiek na sklenené kruhy pri optických teodolitoch, resp. tvorbe čiarových inkrementálnych, alebo kódových kruhov pri elektronických teodolitoch) - pohybuje sa v rozsahu  $2''$  -  $8''$ , vysoké náklady na určenie periodickej chyby kruhu, potreba nákladného testovacieho zariadenia a možnosť zníženia vplyvu chýb v delení kruhu vhodnou technológiou merania vodorovných smerov. Delené kruhy väčšinou nepodliehajú opotrebeniu ani po dlhšej prevádzke, pretože sú konštrukčne chránené pred vonkajšími vplyvmi (Ježko et. al., 2002).

Niektoré známe metódy kalibrácie horizontálnych kruhov teodolitov, ako napr. Schreiberova, Brunsova, Heuvelinkova a Wildova využívajú špeciálny postup pri meraní osnovy smerov, vybranej podľa určitých zásad (Mokroš, 2001).

V súčasnosti sa najčastejšie používa na overenie kvality vodorovných kruhov, resp. presnosti merania uhlov postup vychádzajúci z STN ISO 8322, ktorý predpokladá meranie v dvoch polohách ďalekohľadu, v štyroch skupinách a v dvoch sériách. Merania je potrebné realizovať počas dvoch rôznych dní.

Každá séria meraní pozostáva zo štyroch časovo oddelených skupín meraní smerov. Po dokončení merania v prvej skupine nasleduje 90 minútová prestávka. Po každej skupine sa posunie čítanie na vodorovnom kruhu o  $50^{\text{gon}}$  alebo  $45^{\circ}$ . Súčasťou merania je registrácia aktuálnych poveternostných podmienok (teploty, atmosferického tlaku a vlhkosti ovzdušia). Pri automatickej registrácii nameraných údajov je možné celý proces spracovania automatizovať v počítačovom prostredí.

Presnosť merania uhlov, resp. smerov je podľa tejto normy charakterizovaná strednou chybou „ $m_a$ “. Táto vznikne spolupôsobením celého radu čiastkových – elementárnych chýb prístroja, merača a prostredia v čase merania.

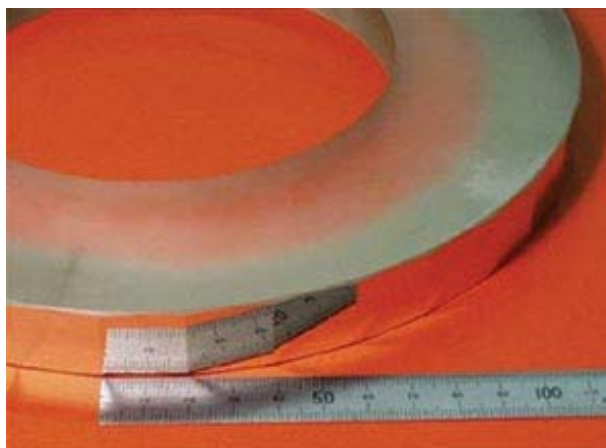
Takto realizovaný postup umožňuje „zistiť“ a potvrdiť, že meradlo zodpovedá predpísaným požiadavkám – umožňuje jeho overenie.

### Automatické zariadenie na kalibráciu horizontálnych kruhov geodetických prístrojov Slovenského metrologického ústavu (SMÚ)

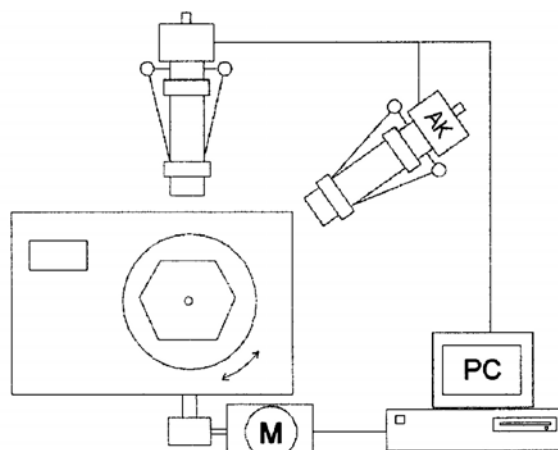
Optické polygóny sú jednou z častí primárneho etalónu rovinného uhla. Je to (väčšinou) pravidelný  $n$ -boký hranol, ktorého funkčné plochy sú rovinné a opracované do zrkadlového lesku. Normály k funkčným plochám tvoria osnovu smerov. Optické polygóny (obr.3) sa vyrábajú s počtom funkčných plôch od 6 do 72, t.j. s nominálnymi uhlami medzi funkčnými plochami  $60^{\circ}$  až  $5^{\circ}$ . Nakoľko ich výroba je technicky veľmi náročná, optické polygóny pre metrologické účely vyrába vo svete len niekoľko firiem. Na optickom polygóne je dôležitý celý rad metrologických parametrov (jeho veľkosť, počet funkčných plôch, hodnoty menovitého uhla).

Pre generovanie osnovy smerov optický polygón však nie je sebestačný (ide o tzv. „nesebestačnú mieru“). Preto je ho potrebné doplniť zariadením, ktoré normály k funkčným plochám detekuje. Na tento účel sa vo väčšine prípadov používa autokolimátor, zriedkavo interferometer.

Obraz zámernej značky, odrazený od zrkadlovej funkčnej plochy polygónu, sa premieta do ohniskovej roviny objektívu ďalekohľadu kolimátora



Obr. 3. Optický polygón  
Fig. 3. Optical traverse



Obr. 4. Etalónové zariadenie na kalibráciu polygónov EZB-3  
Fig. 4. EZB-3 standard equipment for the calibration of traverses

Natočenie zrkadlovej plochy sa prejaví posunom obrazu zámernej značky v ohniskovej rovine. Posun je priamo úmerný uhlovému natočeniu a ohniskovej vzdialenosti. Keďže sú kolimátor a ďalekohľad spojené do jedného celku, je objektív spoločný pre obidve časti a ohnisková rovina je pomocou optického deliaceho systému samostatná pre kolimátorovú a ďalekohľadovú časť. Poloha obrazu zámernej značky sa odčíta pomocou odčítacích systémov rôznych princípov a konštrukcií. Pre presnejšie merania sa používajú fotoelektrické autokolimátory, dosahujúce citlivosť čítania polohy zobrazenia zámernej značky až 0,001" (Mokroš, 2001).

Na kalibráciu optických polygónov sa používajú prevažne dve metódy - metóda dvoch autokolimátorov a metóda deliaceho stola (otočné zariadenie s kruhovou stupnicou) s autokolimátorom. Zariadenie, pracujúce na oboch vyššie menovaných princípoch je súčasťou primárneho etalónu rovinného uhla v SMÚ, ktorý bol v r. 1998 vyhlásený národným etalónom rovinného uhla SR. Primárny etalón umožňuje kalibráciu optických polygónov s kombinovanou štandardnou neistotou korekcií  $u = 0,06''$  (Mokroš, 2001).

Automatické etalónové zariadenie na kalibráciu polygónov EZB-3 je tvorené otočným deliacim stolom ZEISS Jena so servopohonom, na ktorom je uložený kalibrovaný optický polygón a dvojicou fotoelektrických autokolimátorov. Tieto prvky sú umiestnené na liatinovej základovej platni s antivibračným uložením. Schéma etalónového zariadenia EZB-3 je na obr. 4. V základnej polohe sú obidva autokolimátory zacielené na susedné funkčné plochy polygónu a pri postupnom pootáčaní polygónu sa autokolimátormi merajú odchýlky polohy normál k funkčným plochám polygónu vzhľadom k optickým osiam autokolimátorov. Pre kalibráciu teodolitov bolo zariadenie na kalibráciu polygónov EZB-3 doplnené etalónovým 72-bokým optickým polygónom, uloženým na miesto kalibrovaného polygónu.

Jeden z autokolimátorov, slúžiaci zároveň ako súčasť servoriadenia pootáčania deliaceho stola, bol zacielený na optický polygón. Na optický polygón bol centricky uložený kalibrovaný teodolit. Na objektív ďalekohľadu teodolitu bolo upevnené rovinné zrkadlo. Druhý autokolimátor bol uložený na základovú dosku tak, aby jeho optická os bola vo výške osi ďalekohľadu teodolitu. Merací systém s namontovaným prístrojom je na obr. 5.

Pred meraním je nutné splniť justážne podmienky (Mokroš, 2001). Po justáži meracej zostavy sa zacieli autokolimátor polygónu otáčaním otočnej časti stola s polygónom a teodolitom na požadovanú funkčnú plochu polygónu. Potom sa spätným otáčaním alidády teodolitu zacieli druhý autokolimátor na pomocné zrkadlo ďalekohľadu. Čítajú sa údaje obidvoch autokolimátorov a údaj deleného kruhu teodolitu so stanoveným počtom opakovaní. Otočná časť stola sa pootočí na ďalšiu požadovanú funkčnú plochu polygónu a postup sa opakuje. Pootočenie otočnej časti stola o požadovaný uhol, včítane jemného pootočenia pre zacielenie autokolimátora polygónu a odčítanie údajov obidvoch autokolimátorov prebieha automaticky.



Obr. 5. Kalibrácia prístroja Topcon GTS 6B na EZB - 3

Fig. 5. Calibration of the Topcon GTS 6B instrument on the EZB - 3

Pre tieto účely bol merací program kalibrácie polygónov upravený tak, že jeden kalibračný krok pozostával zo snímania údajov obidvoch autokolimátorov a ich prenosu do PC meracieho systému a následné pootočená polygónu s teodolitom o požadovaný uhol (násobok 5°) s neistotou 0,1".

Korekcia deleného kruhu teodolitu je daná funkčnou závislosťou:

$$k_i = f(A_j, k_j^p, B_i, a_j, b_i), \quad (2)$$

kde:

$k_i$  - korekcia deleného kruhu kalibrovaného teodolitu v  $i$ -tom bode deleného kruhu,

$A_j$  - menovitý uhol polygónu pre plochu  $j$ ,

$k_j^p$  - korekcia funkčnej plochy  $j$  polygónu,

$B_i$  - hodnota deleného kruhu teodolitu v  $i$ -tom bode deleného kruhu,

$a_j$  - čítanie stupnice autokolimátora na funkčnej ploche  $j$  polygónu,

$b_i$  - čítanie stupnice autokolimátora teodolitu v  $i$ -tom bode deleného kruhu kalibrovaného teodolitu.

Ak je splnený predpoklad, že delený kruh kalibrovaného teodolitu a stupnica autokolimátorov sú orientované tak, že pri cílení na jednej funkčnej ploche polygónu hodnota čítania teodolitu rastie a hodnota čítania kolimátorov klesá, potom korekcia deleného kruhu teodolitu:

$$k_i = \frac{360}{N}(j-1) + k_j^p - B_i - a_j - b_i, \quad (3)$$

kde:  $N$  ... počet funkčných plôch polygónu.

Takto určené korekcie majú význam u teodolitov s nemennou polohou deleného kruhu. Znalosť korekcií potom umožní vykonať optimalizáciu meracieho postupu pri používaní teodolitu. U teodolitov, umožňujúcich meniť polohu počiatku delenia, dáva priebeh korekcií obraz o priebehu chýb systému čítania horizontálneho kruhu bez možnosti ich korigovania.

Podľa určujúcej rovnice (3) majú na neistotu korekcií vplyv čiastkové zložky- štandardná neistota hodnoty korekcie polygónu, štandardná neistota čítania deleného kruhu teodolitu, štandardná neistota čítania autokolimátora na funkčnej ploche polygónu, štandardná neistota čítania autokolimátora na zrkadle teodolitu, vplyv parametrov funkčnej plochy polygónu na čítanie autokolimátora, vplyv parametrov funkčnej plochy zrkadla teodolitu na čítanie autokolimátora (Mokroš, 2001).

Vplyv čiastkových neistôt samotného kalibračného zariadenia sa začína prejavovať až pri hodnotách neistoty čítania deleného kruhu teodolitu pod 0,5" (Mokroš, 2001).

### Kalibrácia vodorovných kruhov geodetických prístrojov na zariadení EZB-3 SMÚ

Na adaptovanom etalónovom zariadení pre kalibráciu teodolitov EZB -3 boli kalibrované horizontálne kruhy optických i elektronických prístrojov (v r. 2004 - Zeiss Theo 010B, Leica TC 800 a Topcon GTS-6A), pre ilustráciu sú uvedené výsledky z kalibrácie prístroja Leica TC 800.

Grafické znázornenie výsledkov kalibrácie prístroja Leica TC 800 v. č. 407910 je na obr. 6. Uvedené korekcie sú získané z merania pri štyroch otočkách etalónu (štyroch opakovaných meraniach).

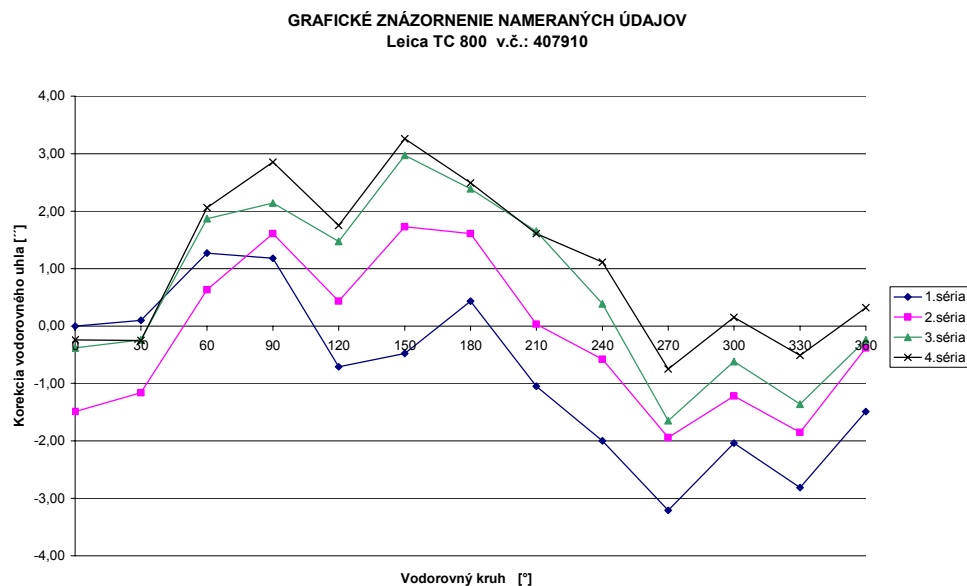
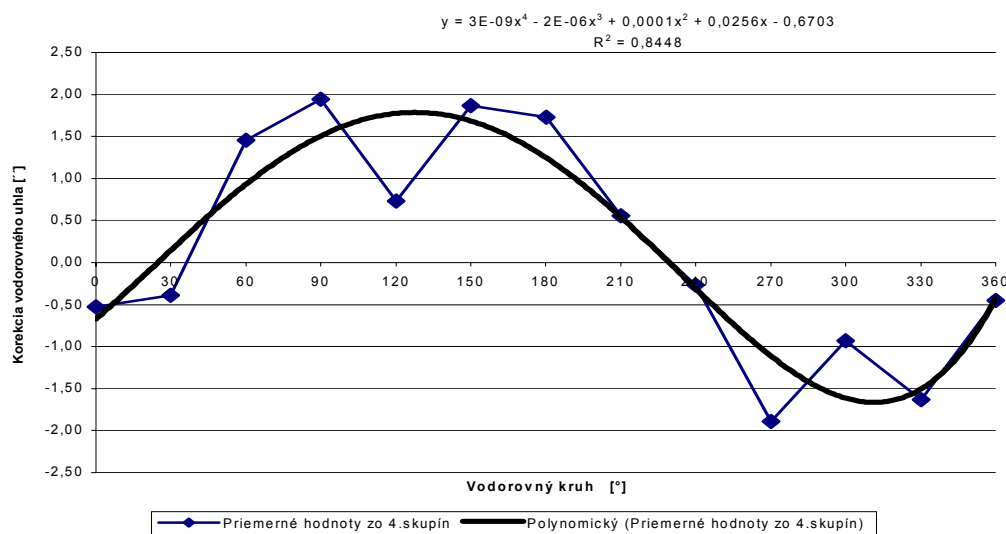


Fig. 6. Graphical interpretation of the corrections of horizontal circle of Leica TC 800 No. 407910



Obr. 7. Grafické znázornenie korekcií vodorovného kruhu Leica TC 800 v. č. 407910 (regresný polynóm)  
 Fig. 7. Graphical interpretation of the correction of horizontal circle of Leica TC 800 No. 407910 (regression polynomial)

Pri vyhodnotení kalibrácií bola vypočítaná rovnica regresnej krivky, ktorá v tomto prípade predstavuje zároveň kalibračnú rovnicu pre jednotlivé prístroje. Najskôr bolo vykonané testovanie odľahlých hodnôt (Ježko et. al., 2002, Vykutíl, 1980) pomocou McKayovho testu na hladine významnosti  $\alpha=1\%$ . Na tomto podklade sa mohlo s 99 % pravdepodobnosťou a s 1 % rizikom konštatovať, že v zistenom súbore korekčných hodnôt pre vodorovný uhol sa nevyskytli odľahlé hodnoty. Regresná analýza bola riešená pomocou softvéru Excel 2000 a jej výsledky (regresný polynóm 4. stupňa) predstavujú kalibračnú krivku a vzťah pre kalibrovaný prístroj (obr. 7) s koeficientom determinácie  $R^2 = 0,84$ .

### Záver

Teodolit, či už optický alebo elektronický (v spojení s diaľkomerom ako IMP), predstavuje v geodézii základný uhlomerný a dĺžkomerný prístroj – pracovné meradlo s nezastupiteľným miestom v meračskej praxi. Popísaný postup kalibrácie umožňuje:

- priamu nadväznosť na primárny etalón rovinného uhla,
- kalibráciu horizontálneho kruhu prakticky všetkých teodolitov,
- minimálny krok kalibrácie  $5^\circ$ , alebo jeho celočíselný násobok,
- určený kalibračný (regresný) polynóm pre vodorovné kruhy geodetických prístrojov (podobne aj kalibračná rovnica určená z nameraných údajov na dĺžkovej základnici) je základným výsledkom kalibrácie a umožňuje kompenzovať chyby delenia vodorovného kruhu kalibrovaného prístroja (obr. 7), resp. kalibrovaného diaľkomera na základnici.

Prezentované výsledky získané kalibráciou vybraných teodolitov potvrdzujú jej potrebu a poukazujú i na zložitosť celého procesu kalibrácie.

Článok bol spracovaný ako súčasť  
grantovej úlohy evid. č. 1/1153/04

### Literatúra – References

- Brezina, I.: Základná metrologická terminológia. In.: Zborník referátov „Metrologia v geodézii“. Katedra geodetických základov SvF STU Bratislava 2001, s. 9-16.
- Bučko, E., Korčák P., Valachovičová, L.: Vývoj parametrov dĺžkovej základnice Hlohovec. In.: Zborník referátov „Metrologia v geodézii“. Katedra geodetických základov SvF STU Bratislava 2001, s. 91-96.
- Bučko, E., Mičuda, J., Mitáš, J.: Vertikálne variácie dĺžkovej základnice Hlohovec. In.: Zborník referátov „Metrologia v geodézii“. Katedra geodetických základov SvF STU Bratislava 2001, s. 97-100.

- Ježko, J.: Medzinárodné prepojenie dĺžkovej základnice Hlohovec. In.: Zborník referátov „Metrológia v geodézii“. *Katedra geodetických základov SvF STU Bratislava 2001, s. 105 -110.*
- Ježko, J., Mokroš, J., Packo, J.: Some Knowledge's from Calibration of Horizontal Circles of Geodetic Instruments. In.: Zborník referátov „INGEO“. *Katedra geodézie SvF STU Bratislava 2002, s. 131-136.*
- Mičuda, J., Korčák, P.: Metodika kalibrácie elektronických diaľkometerov na dĺžkovej základnici Hlohovec. In.: Zborník referátov „Metrológia v geodézii“. *Katedra geodetických základov SvF STU Bratislava 2001, s. 101-105.*
- Mokroš, J.: Kalibrácia horizontálnych kruhov teodolitov. In.: Zborník referátov „Metrológia v geodézii“. *Katedra geodetických základov SvF STU Bratislava 2001, s. 123 - 130.*
- STN 01 0115 Názvoslovie v metrológii. *Január 2001, Slovenský ústav technickej normalizácie, Bratislava.*
- Vykutíl, J.: Teorie chyb a vyrovnávací počet. Vydavateľstvo ES VUT Brno 1980, s. 265-281.