

**UTJECAJNE VELIČINE PRI KALIBRACIJI  
UREĐAJA ZA MJERENJE DUŽINA**

**INFLUENCE QUANTITIES FOR CALIBRATIONS  
IN DIMENSIONAL METROLOGY**

**Nermina Zaimović - Uzunović, Red.prof.dr.,  
Mašinski fakultet u Zenici**

**Daut Denjo, mr,  
Mašinski fakultet u Mostaru**

**REZIME**

*Pri procjeni mjerne nesigurnosti u procesima kalibracije uređaja za mjerenje dužine se uzima u obzir veliki broj utjecajnih veličina. Osnovni elementi mjernog procesa su referentna mjera, mjerna struktura pri prenošenju mjere, kontakt i objekat provjere. Sve poznate utjecaje na mjerni rezultat je potrebno analizirati, da bi se njihovo različito djelovanje korektno navelo u obliku standardnih mjernih nesigurnosti. Za određivanje mjerne nesigurnosti neophodni su validni postupci i primjena osnovnih principa tehnike mjerenja dužina.*

**Ključne riječi:** mjerna nesigurnost, tehnika mjerenja dužina, validnost

**SUMMARY**

*Over the evaluation of uncertainty into process of calibration devices for length measurement we need to take into account a great number of important factors. Basic elements of the measuring process have been reference measurement, measuring structure over transferring dimensions, contact and the object that has been checked. All well-known influences at a measured result have to be analysed, so their different influences would be correctly specified in the form of canonical measured uncertainty. For determination of measuring uncertainty it is essential to have valid methods and the usage of basic measurement techniques of length.*

**Keywords:** Uncertainty of measurement, dimensional metrology, validation

**1. UVOD**

Procjena mjerne nesigurnosti zahtjeva tačnu analizu mjernog procesa, koja treba osigurati da se uzmu u obzir sve izmjerene utjecajne veličine [1]. Analiza se u pravilu može reducirati na manje osnovnih elemenata i principa specifičnih za stručna područja primjenjenih postupaka, što je upravo slučaj u području kalibracije mjerki i uređaja za mjerenje dužina. Ovim se olakšava procjena mjerne nesigurnosti.

## 2. UTJECAJNE VELIČINE

### 2.1. Klima

Od svih utjecaja klime, temperatura zauzima ključnu ulogu. Prema ISO 1, sva mjerenja dužina se izvode na referentnu temperaturu  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ovo zahtjeva uvjete mjerenja, koji po mogućnosti moraju biti blizu  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tačnije mjerenje temperature i po mogućnosti dobru karakteristiku ponašanja temperature mjerne strukture i objekta mjerenja, kao i temperaturne gradijente. Slijedeći utjecaji klime su pritisak, vlažnost, čistoća, brzina strujanja zraka i u najboljem slučaju sadržaj  $\text{CO}_2$  kao i drugi mogući ostaci gasova, što je bitno kod interferometrijskih mjerenja radi određivanja indeksa loma zraka.

### 2.2. Mehanički utjecaji

Pod mehaničkim utjecajima se smatraju vibracije, sila težine, kao i inercija. Djeluju na strukturu mjernih uređaja, objekata provjere i kontaktni sistem, a zavise od krutosti ovih struktura.

### 2.3. Utjecaj geometrije

Odstupanja mjerne mašine od idealne geometrije, objekta ispitivanja ili kontaktnog elementa, vode mjernim greškama, koje se daju samo djelimično izračunati, a time i korigirati. Tu pripadaju greške vođenja mjerne mašine i greške ortogonalnosti osa kod višeosnih sistema. Nesavršena pravost mjernog pravca preko objekta provjere i pravca primjenjene referentne mjere (etalon, mjerni lenjir ili laserski interferometar) vode ka poznatoj kosinus greški.

### 2.4. Faktor kalibracije

Ovdje se ne misli samo na vrijednost kalibracije i pripadajuću mjernu nesigurnost korištenog mjernog sredstva i referentne mjere, već i vremensku stabilnost (drift od posljednje kalibracije), i na odstupanje karakteristike linearnosti, ako ova nije odgovarajuće uzeta u obzir pri kalibraciji.

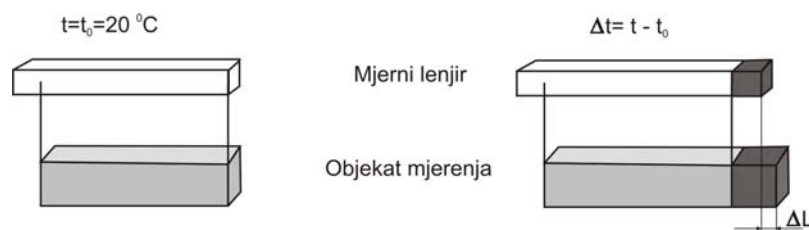
## 3. DJELOVANJE UTJECAJNIH VELIČINA I OSNOVNI PRINCIPI

### 3.1. Utjecaj temperature na referentnu mjeru uređaja i objekat provjere

Utjecaj temperature na mjerne uređaje i objekte mjerenja se posmatra kroz linearne promjene i promjene geometrije.

#### 3.1.1. Linearne promjene na referentnoj mjeri uređaja i objektu mjerenja

Odstupanja od referentne temperature  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  vode linearnoj promjeni dužine referentne mjere uređaja i objekta mjerenja, slika 1.



Slika 1. Termički uvjetovano odstupanje dužine  $\Delta L$  između mjernog lenjira uređaja i predmeta [2]

Pri mjernoj strukturi sa referentnom mjerom (indeks s) i objektom mjerenja (indeks x), proizlazi:

$$L_{x20} = L_{s20}(1 + \alpha_s \cdot \Delta T_s)(1 - \alpha_x \cdot \Delta T_x) \quad (1)$$

Pod pretpostavkom nekoreliranih veličina proizlazi nesigurnost:

$$\left(\frac{u_T(L_x)}{L}\right)^2 = (\alpha_s \cdot u(T_s))^2 + (\Delta T_s \cdot u(\alpha_s))^2 + (\alpha_x \cdot u(T_x))^2 + (\Delta T_x \cdot u(\alpha_x))^2 \quad (2)$$

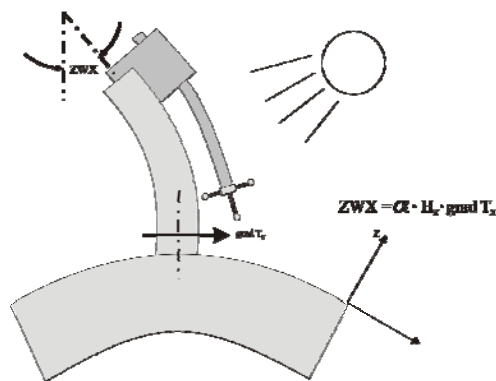
U pravilu treba računati da su individualna odstupanja temperatura referentne mjere i objekta mjerenja od referentne temperature 20 °C korelirana, iako su uzajamne razlike pri kalibraciji većinom beznačajne [2]. Da bi se izbjegle korelacije, uzima se srednje odstupanje  $\Delta T = (\Delta T_s + \Delta T_x)/2$  i srednje odstupanje razlike temperatura  $\delta T = T_s - T_x$ . Tada proizlazi slijedeća kombinirana nesigurnost dužine objekta mjerenja [3]:

$$\left(\frac{u_T(L_x)}{L}\right)^2 = (\alpha \cdot u(\delta T))^2 + (\Delta T \cdot u(\delta \alpha))^2 \quad (3)$$

pri čemu je  $\delta \alpha = < \alpha_s - \alpha_x >$  očekivana razlika koeficijenata istežanja i  $\alpha = (\alpha_s + \alpha_x)/2$  srednji koeficijent rastezanja mjernog lenjira i objekta mjerenja.

### 3.1.2. Promjene geometrije uređaja i objekta mjerenja

Ako u tijelu postoje razlike temperature, za pretpostaviti je da će i u pojedinim slojevima tijela biti različite temperature, što vodi promjeni geometrije tijela. Od svih neidealnih stanja izazvanih temperaturom, temperaturni gradijenti su najteži za ocjenu mogućih efekata na pojavu greške mjerenja. Vertikalni i horizontalni gradijenti utječu na ugaono pomjeranje tijela uređaja, slika 2 [3].



Slika 2. Savijanje uslijed razlika temperature [3]

Objekat mjerenja će se isto tako deformirati ako unutar njega postoje temperaturne razlike, koje nastaju uslijed termičkih utjecaja okoline. Temperaturne razlike u objektima mjerenja nisu dopuštene, pa nam jedino ostaje na raspolaganju, održavanje temperature u mjernim prostorima u vrlo uskim granicama.

### 3.2. Mehaničke sile pri kontaktu

Pod utjecajem mjerne sile deformiraju se taster i kontaktna površina mjerenog objekta. Ako je objekat mjerenja ravna površina na koju silom  $F$  djeluje mjerni pipak sa kuglastom kapičom prečnika  $D$ , iznos deformacije  $\delta$  se računa prema Hertzovom obrascu, [2]

$$\delta = \frac{1}{2} \left[ 3F \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

gdje su:

$E_1$  i  $E_2$  – moduli elastičnosti ravnog objekta i kugle  
 $\nu_1$  i  $\nu_2$  – Poissonovi koeficijenti

Iz jednačine (7) relativna nesigurnost deformacije  $\delta$  u ovisnosti od nesigurnosti mjerne sile  $F$  je [2]

$$\frac{u_F(\delta)}{\delta} = \frac{2}{3} \frac{u(F)}{F} \quad (5)$$

### 3.3. Mehanički utjecaji na objekat provjere

Mehaničke deformacije objekta mjerenja nastaju uslijed sopstvene težine (pogrešno oslanjanje), razlike temperatura i unutrašnjih napona. Često se teško kvantificiraju i korigiraju, pa ih je stoga potrebno umanjiti odgovarajućim mjerama. Pri oslanjanju mjerki, iste se deformiraju uslijed sopstvene težine. Optimizacijom tačaka oslanjanja, ovi efekti se minimiziraju [4].

Isto tako važan je i kinematički oslonac objekta i izbjegavanje deformacija izazvanih silom pritezanja. Ako je neophodno, objekat mjerenja treba po mogućnosti pritezati direktno preko oslonih tačaka.

### 3.4. Utjecaj geometrije

Odstupanja mjerne mašine od idealne geometrije, objekta ispitivanja ili kontaktnog elementa, vode mjernim greškama, koje se daju samo djelimično izračunati, a time i korigirati. Tu pripadaju greške vođenja mjerne mašine i greške ortogonalnosti osa kod višeosnih sistema. Nesavršena pravost mjernog pravca preko objekta provjere i pravca primjenjene referentne mjere (etalon, mjerni lenjir ili laserski interferometar) vode ka poznatoj kosinus greški.

#### 3.4.1 Geometrija mjerne strukture

Kod mjerenja dužina, uvijek gdje je moguće, treba mjerenu dužinu i referentnu dužinu držati na što manjom bočnom rastojanju  $\Delta A$  (Abbeov princip). Mjerna nesigurnost dužine, uvjetovana Abbeovim principom računa se

$$u_A^2(L) = \left( \frac{u(\Delta A)}{\Delta \alpha} \right)^2 + \left( \frac{\Delta A}{\Delta \alpha^2} u(\Delta \alpha) \right)^2 \quad (6)$$

pri čemu je  $u(\Delta \alpha)$  nesigurnost greške ugla po korekciji ili, ako nije uzeta korekcija, standardno odstupanje vođenja je uglovna greška [2].

#### 3.4.2 Odstupanje tastera od idealne geometrije

U tehnici mjerenja dužina koriste se uglavnom kontaktni elementi s ravnom ili sferičnom površinom. Odstupanja od ravnosti i paralelnosti dvaju tastera se provjeravaju mjerenjem. Ako je taster prije mjerenja podešen (nuliran) na jednom etalonu slične geometrije,

kompenzira se dio mjerne greške proizvedene odstupanjem geometrije. Odstupanja od idealne geometrije imaju značajnu ulogu, ako kugla izvodi dodir na različitim mjestima površine, kao što je slučaj u kordinatnoj mjernoj tehnici ili pri mjerenju navoja.

### **3.4.3 Odstupanje objekta provjere od idealne geometrije**

Pretpostavlja se da su kalibrirajuće utjelovljene mjerke idealne geometrije. Ipak, u praksi se stalno računa sa odstupanjima od oblika, koja su često nepotpuno obučena i za korektan mjerni rezultat se teško korigiraju.

### **3.5. Kosinus greška**

Kosinus greška nastaje kada mjerena dužina nije paralelna sa referentnom mjerom. Pri tome nastaje odstupanje

$$\Delta L_{\cos} = L(1 - \cos \alpha) \approx \frac{1}{2} \alpha^2 L \quad (7)$$

U pravilu, treba postići što je moguće bolje poravnanje i ugao  $\alpha$  svesti na nulu. U takvim slučajevima je [2]

$$u_{\cos}(L) = u(\Delta L_{\cos}) = u^2(\alpha)L \quad (8)$$

### **3.6. Kalibracija referentne mjere**

Vrijednost kalibracije referentne mjere, s pripadajućom mjernom nesigurnosti, uzima se iz certifikata o kalibraciji. Često se u budžetu mjerne nesigurnosti zaboravlja doprinos, koji u datom slučaju odgovara nastaloj promjeni od posljednje kalibracije. Procjena maksimalne vrijednosti za ovu vremensku promjenu izvodi se iz iskustva i uvijek, gdje je moguće, na osnovu dokumentirane historije prijašnjih kalibracija referentne mjerke.

### **3.7. Kalibracija tastera**

Ako se primjenjeni sistem tastera ne koristi samo kao detektor nule, već se koristi preko cijelog mjernog područja, tada se većinom osjetljivost kalibracije kvantificira kao karakteristika odstupanja linearnosti, i u najboljem slučaju se može korigirati.

## **4. OSTALI UTJECAJI KOJI DOPRINOSE MJERNOJ NESIGURNOSTI**

U grupu ostalih utjecaja koji doprinose mjernoj nesigurnosti u procesima kalibracije spadaju:

- šumovi,
- digitalna razlučivost,
- prenosna funkcija,
- numerički postupci i
- definicija mjerene veličine.

## **5. ZAKLJUČAK**

Iz gore navedenog proizilazi da se procesi kalibracija uređaja za mjerenje dužina mogu sistematski i u potpunosti analizirati, a time i identificirati bitni doprinosi mjernoj nesigurnosti. Za kvantitativnu procjenu standardnih mjernih nesigurnosti pojedinačnih utjecajnih veličina, neohodno je znanje mjeritelja. Isto tako bi se moglo uvesti kod kompliciranih međuzavisnosti ograničavanje na matematski model procesnih koraka, time se

produbljuju iskustva za procjenu koeficijenata osjetljivosti, u najboljem slučaju su nužna numerička ili eksperimentalna istraživanja.

## 6. LITERATURA

- [1] Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Deutsche Institut für Normung, 1 Auflage 1995.
- [2] R. Thalmann: "Einflussgrößen bei der Kalibrierung von Längenmessmitteln", Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Schweis, Manuskripteingang, 2005
- [3] M. Schaller, K. Tischler: Eindimensionale Längenprüftechnik, Beuth – Kommentare, DIN Deutsches Institut für Normung, 1. Auflage 1993, ISBN 3-410-12766-6
- [4] Wäldele, M. Franke, F. Härtig, H. Schwenke, E. Trapet: Simulationsverfahren für Koordinatenmesstechnik, PTB, Fachberich Koordinatenmesstechnik, Braunschweig, Novemeber 2004