

**PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI KOD KALIBRACIJE
KIDALICE ZA MJERNO PODRUČJE OD 500 kN**

**ESTIMATION OF THE MEASUREMENT UNCERTAINTY IN THE
CALIBRATION OF TESTING MACHINE FOR MEASURING RANGE
500 kN**

Prof.dr. Mirsada Oruč, dipl.inž.
Univerzitet u Zenici,
Fakultetska 3, 72 000 Zenica, BiH

Mr.sc. Branka Muminović, dipl.inž.
Univerzitet u Zenici, OJ Metalurški
institut „Kemal Kapetanović“ Zenica,
Travnička cesta 7, 72000 Zenica, BiH

Doc.dr. Raza Sunulahpašić, dipl.inž.
Doc.dr. Almaida Gigović-Gekić, dipl.inž.
Univerzitet u Zenici,
Fakultet za metalurgiju i materijale,
Travnička cesta 1, 72000 Zenica, BiH

REZIME

Cilj svakog mjerenja je određivanje vrijednosti mjerene veličine. Mjerni rezultat je samo procjena vrijednosti mjerene veličine i potpun je samo kada je praćen iskazom nesigurnosti te procjene. Nesigurnost rezultata mjerenja odražava pomanjkanje tačnog znanja vrijednosti mjerene veličine. U ovom radu prezentovani su rezultati kalibracije analogne skale kidalice mjernog područja 500 kN i pokazivanja pripadajućeg softvera testXpert. Na bazi rezultata kalibracije i karakteristika prenosnog etalona koji se koristio za kalibraciju postavljen je model i procijenjene su pojedinačne standardne, kombinovana i proširena mjerna nesigurnost.

Ključne riječi: mjerna nesigurnost, prenosni etalon sile, kalibracija, kidalica, mjerno područje

SUMMARY

The goal of each measurement is to determine the value of the measured quantity. Measurement result is only an estimate of the value of the measured quantity and it is complete only when accompanied by the testimony of uncertainty of this estimate. The uncertainty of the measurement results reflects the lack of exact knowledge of the value of the measured quantity. This paper presents the results of calibration analog scale testing machine with measuring range of 500 kN and display of the associated software TestXpert. Based on the results of the calibration and characteristics of the transmission standards which are used for calibration is set model and estimated the individual standard, combined and expanded uncertainty.

Keywords : measurement uncertainty, portable standard force, calibration, testing machine, measuring range

1. UVOD

U svakom mjerenju postoje nesavršenosti koje dovode do grešaka koje su uglavnom nepoznate i dijele se na [1]: slučajne, sistematske i grube.

Slučajne greške su rezultat nepredvidivih i slučajnih vremenskih i prostornih promjena uticajnih veličina. One predstavljaju rezultat mjerenja umanjen za srednju vrijednost beskonačnog broja mjerenja iste mjerene veličine pod istim uslovima. Sistematske greške predstavljaju razliku srednje vrijednosti koja bi proizašla iz beskonačnog broja mjerenja iste mjerene veličine izvedene pod istim uslovima i „stvarne“ vrijednosti mjerene veličine. Grube greške nastaju uglavnom kod zapisivanja i analize podataka rezultata mjerenja i one se mogu eliminisati provjerom podataka te se ne uzimaju u obzir kod procjene mjerne nesigurnosti.

Nesigurnost rezultata nije uvijek pokazatelj vjerovatnoće da je taj rezultat mjerenja blizu „stvarne“ vrijednosti mjerene veličine [2].

Mjerni rezultat je ustvari samo pouzdana procjena dobivene vrijednosti mjerene veličine a njegova kombinovana nesigurnost pouzdana mjera njegove moguće greške [3].

2. IZVORI MJERNE NESIGURNOSTI

Teoretski gledano broj izvora nesigurnosti može biti beskonačan. Kako se u razmatranje može uzeti samo ograničen broj izvora nesigurnosti, tako se za izraženu nesigurnost rezultata mjerenja može reći da predstavlja samo ocjenu neke «stvarne» nesigurnosti. Iz tog razloga kod ocjene nesigurnosti rezultata mjerenja u obzir treba uzeti one izvore nesigurnosti koji daju najveće doprinose [4]:

- nepotpuna definicija mjerene veličine,
- neadekvatno poznavanje uticaja uslova okoline ili neidealno mjerenje uslova okoline,
- rezolucija skale uređaja,
- nedovoljno tačne vrijednosti mjernih etalona i referentnih materijala,
- pretpostavke u metodama i procedurama mjerenja,
- varijacije u ponovljenim mjerenjima mjerene veličine koje se ponavljaju pod skoro identičnim uslovima.

Prema dokumentu EA-4/02 mjerna nesigurnost se sastoji iz više doprinosa i to:

- Doprinosi tipa A koji se izračunavaju nekom od statističkih metoda, odnosno čija se ocjena zasniva na statistici ponovljenih mjerenja,
- Doprinosi tipa B koji se izračunavaju na neki drugi način i mogu se zasnovati na naučnom prosuđivanju metodama koje nisu statističke.

Prema dokumentu EA-4/02 mjerna nesigurnost se daje kao standardna mjerna nesigurnost pomnožena s faktorom prekrivanja $k=2$, koja za normalnu raspodjelu odgovara nivou povjerenja od približno 95%.

3. KALIBRACIJA KIDALICA

Za kalibraciju uređaja za mjerenje sile koriste se prenosi etaloni za silu koji pripadaju mjerilima sile sa elastičnim elementima. Prenosni etaloni sile se sastoje od:

- Mjerne ćelije odnosno deformacijskog tijela određenog mjernog područja,
- Mjernog pojačala signala sa uređajem za očitavanje izlaznog signala,
- Kabla za ostvarivanje fizičke veze između mjerne ćelije i pojačala signala.

Kalibracija ispitnih mašina za mjerenje sile realizuje se prema zahtjevima standarda BAS EN ISO 7500-1 i odnosi se na kalibraciju sistema za mjerenje sile. Kalibracija se može realizovati kod konstantne indicirane sile ili kod konstantne stvarne sile [5].

Primijenjeni etaloni sile za kalibraciju moraju biti bolje ili iste klase kao i mašina koja se kalibriše. Mjerna ćelija, koja se koristi za kalibraciju, se pozicionira u uređaj koji se kalibriše i

opteretiti najmanje tri puta od nule na skali mašine do maksimalne sile mjernog područja. Tri serije mjerenja trebaju biti urađene sa povećanjem sile i jedna sa smanjenjem sile u najmanje 5 mjernih tačaka ravnomjerno raspoređenih po mjernom području ispitne mašine. Kod svakog mjerenja mjerna ćelija se u mašini rotira za 120° i 240° ili 180° i 360° u zavisnosti od konstrukcije same mašine. Za prvu mjernu tačku uzima se 20% a za zadnju 100% vrijednost mjernog područja ispitne mašine.

3.1. Model za procjenu proširene mjerne nesigurnosti

Model za procjenu proširene nesigurnosti usklađen je prema dokumentu EURAMET cg-4 i uključuje slijedeće [6]:

1. Procjenu kombinovane nesigurnosti vezane za prenosni etalon, u_{cpet} i to:
 - procjenu standardne nesigurnosti prenosnog etalona sile za specificirano mjerno područje sile, u_{cal} ,
 - procjenu standardne nesigurnosti zbog dugoročne nestabilnosti prenosnog etalona, u_{drift} ,
 - procjenu standardne nesigurnosti zbog uticaja temperature, u_{temp} .
2. Određivanje relativnih grešaka procijenjenih iz rezultata kalibracije ispitne mašine i procjenu pripadajućih standardnih nesigurnosti koje se odnose na ponovljivost u_{rep} , rezoluciju u_{res} , histerezu u_v i nulu u_{fo} ,
3. Određivanje standardne kombinovane nesigurnosti, u_c ,
4. Određivanje proširene nesigurnosti U .

Kombinovana nesigurnost vezana za prenosni etalon data je jednačinom:

$$u_{cpet} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{temp}^2} \cdot \dots (1)$$

Nesigurnost prenosnog etalona uzima se iz sertifikata o kalibraciji etalona i izražena je kao proširena nesigurnost U . Budući da je nivo povjerenja 95 % i faktor prekrivanja $k=2$, standardna nesigurnost prenosnog etalona sile je:

$$u_{cal} = \frac{U}{k} \cdot \dots (2)$$

Procjena standardne nesigurnosti zbog dugoročne nestabilnosti prenosnog etalona odnosi se na nesigurnost zbog drifta uzrokovanog osjetljivošću etalona. Drift predstavlja, za isti nivo sile, odnosno za istu mjernu tačku, promjenu očitavanja u dvije uzastopne rekalkibracije i računa se prema jednačini:

$$d = \frac{X_{last} - X_{prev}}{X_{last}} \cdot 100 \cdot \dots (3)$$

U slučaju pravougaone raspodjele standardana nesigurnost zbog drifta prenosnog etalona je

$$u_{drift} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \dots (4)$$

Standardna nesigurnost zbog uticaja temperature se može zanemariti jer prenosni etaloni sile, koji je korišten za kalibraciju ispitne mašine, posjeduje temperaturnu kompenzaciju.

Standardne nesigurnosti procijenjene iz relativnih grešaka izračunatih iz rezultata mjerenja na ispitnoj mašini su:

- Relativna standardna nesigurnost vezano za ponovljivost, u_{rep} ,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za rezoluciju skale ispitne mašine, u_{res} ,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za reverzibilnost ili histerezu, u_v ,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za nulu, u_{fo} .

Relativna standardna nesigurnost vezana za ponovljivost, za svaki primjenjeni nivo sile je standardno odstupanje ocijenjene vrijednosti srednje greške i računa se prema jednačini:

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \left(\frac{100}{\overline{F}_i} \cdot \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{j=1}^n (F_{ij} - \overline{F}_i)^2} \right). \quad \dots (5)$$

Relativna standardna nesigurnost vezano za rezoluciju skale ispitne mašine, uz pretpostavku pravougaone raspodjele, računa se prema jednačini:

$$u_{res} = \frac{a}{2 \cdot \sqrt{3}}. \quad \dots (6)$$

gdje je a rezoluciju skale ispitne mašine i računa se prema jednačini:

$$a = \frac{r}{F} \cdot 100. \quad \dots (7)$$

Relativna standardna nesigurnost vezano za reverzibilnost ili histerezu je, za svaki primjenjeni nivo sile, doprinos zbog razlike u izmjerenim vrijednostima iste mjerne serije kod povećanja sile i kod smanjenja sile kod pozicije rotacije mjerne ćelije u ispitnoj mašini. Izražava se kao relativna vrijednost i temelji se na pravougljnoj raspodjeli. Računa se iz slijedeće jednačine:

$$u_v = \frac{\nu}{2 \cdot \sqrt{3}}. \quad \dots (8)$$

gdje je ν relativna greška histereze i računa se prema jednačini:

$$\nu = \frac{F'_i - F_i}{F} \cdot 100. \quad \dots (9)$$

Relativna standardna nesigurnost vezano za nulu, je doprinos nesigurnosti koji je rezultat mogućnosti da pokazivanje nule izlazne mjerene vrijednosti varira između mjernih nizova - slijedeće mjerenje izlazne vrijednosti. Ovaj efekat se izražava kao relativna vrijednost i temelji se na pravougljnoj raspodjeli. Računa se iz jednačine:

$$u_{f_0} = \frac{f_0}{2 \cdot \sqrt{3}}. \quad \dots (10)$$

gdje je f_0 relativna greška nule koja se računa za svaki mjerni niz prema jednačini:

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} \cdot 100. \quad \dots (11)$$

Standardna kombinovana nesigurnost data je kao kvadratni korijen iz sume umnožaka kvadrata standardnih nesigurnosti prema jednačini:

$$u_c = \sqrt{u_{cpet}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_v^2 + u_{f_0}^2}. \quad \dots (12)$$

Proširena nesigurnost U se računa množenjem vrijednosti kombinovane standardne nesigurnosti u_c sa faktorom prekrivanja $k=2$ za svaki nivo sile unutar kalibracionog područja i može se izraziti kao relativna vrijednost ili u jedinicama sile prema jednačini:

$$U = u_c \cdot k. \quad \dots (13)$$

4. EKSPERIMENTALNI RAD

Kalibracija kidalice 50 SZBDA je provedena u Mehaničkom laboratoriju Metalurškog instituta „Kemal Kapetanović“ Zenica sa prenosnim etalom sile MGCplus Z4-500 kN prema proceduri propisanoj u standardu BAS EN ISO 7500-1. Tri serije mjerenja su urađene sa povećanjem sile i jedna sa smanjenjem sile u pet mjernih tačaka. Kod kalibracije analogne

skale urađena je dodatna serija mjerenja bez pomoćne kazaljke. Ista procedura je ponovljena kod kalibracije pokazivanja pripadajućeg softvera testXpert.

U tabeli 1. su prikazani rezultati kalibracije analogne skale kidalice i procijenjene relativne greške u mjernom području od 100 kN do 500 kN.

Tabela 1. Rezultati kalibracije analogne skale kidalice [7]

Opterećenje, kN						Relativne greške, %			
Stvarno	Indicirano na analognoj skali					q	b'	v	res
	0°		120°	240°					
	Bez kazaljke	Sa kazaljkom							
100	100,6	100,5	100,5	100,6	100,7	0,50	0,10	0,10	0,10
200	201,0	200,8	200,9	200,8	200,9	0,40	0,10	0,05	0,05
300	301,0	300,6	300,9	300,8	300,9	0,27	0,13	0,03	0,03
400	400,6	400,5	400,7	400,4	400,6	0,13	0,08	0,05	0,03
500	499,4	499,2	499,8	499,3	499,3	-0,12	0,12	0,00	0,02

Vrijednosti pojedinačnih standardnih nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije analogne skale kidalice i standardne nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz karakteristika prenosnog etalona koji se koristio za kalibraciju kidalice, kombinovana, odnosno proširena mjerna nesigurnost po kalibracionim tačkama date su u tabeli 2.

Tabela 2. Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost – analogna skala [7]

Stvarno opterećenje, kN	Standardne nesigurnosti, %						u _c %	k	U %
	u _{rep}	u _{res}	u _v	u _{cal}	u _{drift}	u _{cpet}			
100	0,041	0,029	0,087	0,042	-0,012	0,04	0,11	2	0,22
200	0,020	0,014	0,043	0,032	-0,011	0,03	0,06		0,12
300	0,030	0,010	0,029	0,028	-0,011	0,03	0,05		0,10
400	0,023	0,007	0,043	0,026	-0,010	0,03	0,06		0,12
500	0,037	0,006	0,000	0,025	-0,009	0,03	0,05		0,10

U tabeli 3. su dati rezultati kalibracije pokazivanja pripadajućeg softvera testXpert i procijenjene relativne greške u mjernom području od 100 kN do 500 kN.

Tabela 3. Rezultati kalibracije pokazivanja softvera [7]

Opterećenje, kN					Relativne greške, %			
Stvarno	Indicirano na softveru				q	b'	v	res
	0°	120°	240°					
100	100,100	100,200	100,250	100,300	0,18	0,15	0,05	0,0010
200	200,250	200,350	200,355	200,450	0,16	0,05	0,05	0,0005
300	300,455	300,680	300,570	300,750	0,19	0,08	0,06	0,0003
400	400,360	400,790	400,860	400,985	0,17	0,13	0,03	0,0003
500	500,155	500,850	500,650	500,650	0,11	0,14	0,00	0,0002
Zaostatak nule	0,195	0,220	0,155					

Vrijednosti pojedinačnih standardnih nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije pokazivanja softvera i standardne nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz karakteristika prenosnog etalona, kombinovana, odnosno proširena mjerna nesigurnost po kalibracionim tačkama data je u tabeli 4.

Tabela 4. Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost - pokazivanje softvera [7]

Stvarno opterećenje, kN	Standardne nesigurnosti, %						u_c %	k	U %
	u_{rep}	u_{res}	u_v	u_{cal}	u_{drift}	u_{cpet}			
100	0,044	0,0003	0,043	0,042	-0,012	0,04	0,08		0,16
200	0,017	0,0001	0,041	0,032	-0,011	0,03	0,06		0,12
300	0,022	0,0001	0,052	0,028	-0,011	0,03	0,06	2	0,12
400	0,039	0,0001	0,027	0,026	-0,010	0,03	0,06		0,12
500	0,041	0,0001	0,000	0,025	-0,009	0,03	0,05		0,10
$f_0=0,011\%$									

5. ZAKLJUČCI

- Mjerna nesigurnost je nezaobilazan parametar kod realizacije kalibracije ispitnih mašina i uzima se u obzir kod izražavanja rezultata mjerenja,
- Na vrijednost proširene nesigurnosti mjernog područja ispitne mašine utiče nesigurnost korištenog prenosnog etalona za kalibraciju ispitne mašine koja uključuje i nesigurnost referentnog etalona odnosno CMC referentnog etalona,
- Na bazi rezultata mjerenja, procijenjenih relativnih grešaka i pripadajućih nesigurnosti značajan je doprinos nesigurnosti koji proizilazi iz ponašanja ispitne mašine u toku realizacije mjerenja (ponovljivost rezultata mjerenja, histereza),
- Značajan doprinos mjernoj nesigurnosti potiče od rezolucije skale indikatora za pokazivanje sile što je posebno značajno na nižim vrijednostima sile mjernog područja ispitne mašine.

6. LITERATURA

- [1] N.Zaimović-Uzunović: Mjeriteljska infrastruktura, Mašinski fakultet u Zenici, Univerzitet u Sarajevu, Zenica, 2003.
- [2] ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, Switzerland, First Edition, 1993.
- [3] N.Zaimović-Uzunović, S.Lemeš: Mjerenja i kvalitet, Politehnički fakultet, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2012.
- [4] EA-4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, EA European co-operation for Accreditation, 1999.
- [5] BAS EN ISO 7500-1/2005: Metallic materials – Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/Compression testing machines – Verification and calibration of the force - measuring system.
- [6] EURAMET cg-04: Uncertainty of Force Measurements - Calibration Guide, European Association of National Metrology Institutes, Version 2.0, 2011.
- [7] B. Muminović: Kvantifikacija pojedinačnih doprinosa i proračun proširene mjerne nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona za silu, magistarski rad, Fakultet za metalurgiju i materijale, Univerzitet u Zenici, 2014.