

**IZBOR OPTIMALNOG STEPENA POLINOMA I PRORAČUN
INTERPOLACIJSKOG OdstUPANJA KOD KALIBRACIJE
PRENOSNOG ETALONA SILE MGCplus-Z4/200 kN**

**THE SELECTION OF THE OPTIMAL DEGREE OF POLYNOM AND
CALCULATION OF THE INTERPOLATION DEVIATION IN THE
CALIBRATION OF TRANSFER FORCE STANDARD
MGCplus-Z4/200**

**Branka Muminović
Sinha Korlat-Mahmić**

**Omer Beganović
Alma Čelebić-Malkić**

**University of Zenica, Institute of Metallurgy „Kemal Kapetanović“
Bosnia and Herzegovina**

REZIME

Za kalibraciju uređaja za mjerenje sile koriste se etaloni sile koji se kalibrišu u skladu sa standardom ISO 376. Ovaj standard definiše kriterije klasifikacije etalona sile na osnovu kojih se određuje njihova klasa. Jedan od značajnih kriterija klasifikacije je relativna greška interpolacije koja se određuje za polinom karakterističnog stepena koji određuje zavisnost izlaznih podataka o sili a dobiven je iz rezultata mjerenja. U ovom radu date su kalibracione krive opisane polinomima različitih stepena određene na temelju srednjih vrijednosti očitavanja sile kod kalibracije prenosnog etalona sile MGCplus-Z4/200 kN. Na osnovu izračunatih koeficijenata polinoma proračunate su greške interpolacije za polinome različitih stepena i izvršen izbor optimalnog stepena polinoma.

Ključne riječi: prenosni etalon sile, kalibraciona kriva, kalibracija

SUMMARY

Force standards are used for calibration machine for forces measurement. These standards are calibrated according to standard ISO 376. ISO 376 defines classification criteria of force standards on which their class is determined. One of the significant classification criteria is the relative error of interpolation, which is determined by polynomial with characteristic degree. This polynomial determines the dependence of the output force data obtained from the measurement results. This paper presents the interpolation curves described by polynomials of different degrees determined on the case of the mean values of readings of force recorded during calibration of transfer force standard MGCplus-Z4/200 kN. Relative errors of interpolation have been calculated for different degrees of polynomials and the optimal degree of the polynomial, have been chosen.

Keywords: transfer force standard, calibration curve, calibration

1. UVOD

Mehanički laboratorij Metalurškog instituta „Kemal Kapetanović“ Zenica akreditovan je prema standardu BAS EN ISO/IEC 17025 za kalibraciju uređaja za mjerenje sile od strane

Instituta za akreditiranje Bosne i Hercegovine – BATA i Norveškog akreditacionog organa – NA. Kalibraciju uređaja za zadavanje sile Mehanički laboratorij realizuje u skladu sa zahtjevima standarda BAS EN ISO 7500-1. Za kalibraciju koristi prenosne etalone sile u mjernom području od 50 N do 5000 kN koje redovno rekalibriše u skladu sa standardom ISO 376. Institut za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine još uvijek nije obezbijedio preduslove za formiranje nacionalne laboratorije za silu niti je dao povjerenje i podršku bilo kojoj drugoj laboratoriji u Bosni i Hercegovini za realizaciju ovih aktivnosti. Shodno tome, Mehanički laboratorij svoje prenosne etalone sile rekalibriše u za to akreditovanim ili nacionalnim laboratorijama van granica Bosne i Hercegovine. Standard ISO 376 definiše proceduru kalibracije i kriterije ocjenjivanja, odnosno klasifikaciju prenosnog etalona sile.

2. PRENOSNI ETALON SILE MGCplus-Z4/200 kN

Prenosni etalon sile MGCplus-Z4/200 kN sastoji se od sljedećih komponenti:

- Čelije za silu mjernog područja 200 kN
- pojačivačkog sistema MGCplus sa uređajem za očitavanje
- kabla kojim se ostvaruje fizička veza između ćelije i pojačivačkog sistema

Na slici 1 prikazana je mjerna ćelija za silu od 200 kN a u tabeli 1 date su njene osnovne karakteristike.



Slika 1. Mjerna ćelija za silu od 200 kN

Tabela 1. Karakteristike mjerne ćelije za silu

Nominalna sila	200 kN
Mjerno područje	20 kN do 200 kN
Tip	Z4
Serijski broj	031430032
Proizvođač	HBM, Germany
Godina proizvodnje	2000.
Prva kalibracija	PTB Njemačka
Smjer opterećenja	pritisak, zatezanje

Na slici 2 prikazan je pojačivački sistem MGCplus sa uređajem za očitavanje a u tabeli 2 date su njegove tehničke karakteristike.



Slika 2. Pojačivački sistem MGCplus

Tabela 2. Karakteristike pojačivačkog sistema

Proizvođač	HBM Njemačka
Serijski broj	864441
Tip	MGCplus AB 22 A ML30
Mjerno područje	0-2,5000 mV/V
Napon napajanja mosta	5V
Rezolucija	0,00001 mV/V

3. KALIBRACIJA PRENOSNOG ETALONA MGCplus-Z4/200 kN

3.1 Procedura kalibracije

Kalibracija prenosnog etalona sile je provedena na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje na GTM-ovoj referentnoj mašini prema zahtjevima standarda ISO 376. Kalibracija se realizovala opterećenjem etalona do nominalne sile u zahtjevanom smjeru. Ovo je ponovljeno tri puta. Bilježene su vrijednosti kod rastuće sile u mjernim nizovima X1, X2, X3 i X5 i vrijednosti kod opadajuće sile u mjernim nizovima X4' i X6'. Nakon mjernih nizova X1 i X2 mjerna ćelija je dislocirana sa referentne mašine, zarotirana za 120^0 , ponovo pozicionirana u referentnu mašinu te su očitane vrijednosti mjernog niza X3 kod rastuće sile i X4' kod opadajuće sile. Zatim je mjerna ćelija ponovo dislocirana, zarotirana za 120^0 , opet pozicionirana i očitane su vrijednosti mjernog niza X5 kod rastuće sile i mjernog niza X6' kod opadajuće sile.

3.2 Kriteriji ocjenjivanja prenosnog etalona

Za prenosne etalone sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativna greška obnovljivosti
- relativna greška ponovljivosti
- relativna greška interpolacije
- relativna greška nule
- relativna greška reverzibilnosti ili histerze

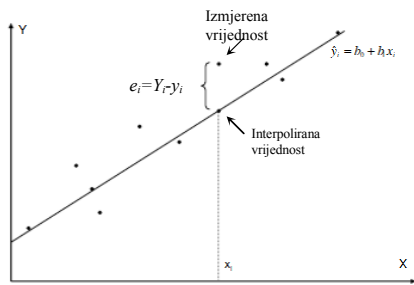
Prema vrijednostima ovih kriterija i vrijednosti nesigurnosti primjenjene kalibracione sile, određuje se kojoj od četiri klase pripada etalon sile, tabela 3. Istovremeno moraju biti zadovoljeni svi kriteriji [1].

Tabela 3. Kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona

Klasa	Relativne greške prenosnog etalona %					Nesigurnost primjenjene kalibracione sile $k=2$ %
	Obnovljivosti b	Ponovljivosti b'	Interpolacije f_c	Nule f_0	Reverzibilnosti v	
00	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	$\pm 0,01$
0,5	0,10	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	$\pm 0,02$
1	0,20	0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,050$	0,30	$\pm 0,05$
2	0,40	0,20	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	0,20	$\pm 0,10$

4. PRORAČUN INTERPOLACIJSKOG OdstUPANJA

Kod kalibracije prenosnog etalona dobijeni podaci su rezultat mjerenja. Budući da je svako mjerenje praćeno greškama, koje se javljaju u toku mjerenja, dobijeni podaci odnosno rezultati mjerenja bit će u blizini kalibracione krive pri čemu ta kriva neće prolaziti kroz sve tačke. Metodom najmanjih kvadrata traže se parametri proizvoljne krive, tako da je pretpostavljena funkcija najbolje opisana zadanim tačkama, slika 3. Kriterij kod određivanja kalibracione krive je da suma kvadrata izmjerenih odstupnja ($e_i = Y_i - y_i$) od krive bude minimalna, gdje Y_i



Slika 3. Metoda najmanjih kvadrata [2]

predstavljaju izmjerene vrijednosti a y_i vrijednosti tražene funkcije za određeni x_i .
Uslov minimalnih kvadrata je:

$$S = \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \min \quad \dots (1)$$

Ako niz tačaka ne pokazuju pravolinijsku tendenciju biramo polinom drugog reda, odnosno parabolu ili višeg reda tako da ona najmanje odstupa od datih tačaka.

Parametri koji se pojavljuju u jednačinama krivih određeni su tako da zbir kvadrata vertikalnih odstupanja tačaka regresione krive bude najmanje moguć. Postavlja se pitanje koji stepen polinoma je potreban za aproksimaciju. Naravno da će se povećanjem stepena polinoma smanjivati odstupanje. U praksi to znači da se povećava stepen polinoma sve dok postoji znatno smanjenje odstupanja. Greška interpolacije se određuje za polinom karakterističnog stepena koji određuje zavisnost izlaznih podataka o izmjerenoj sili a dobiven je iz rezultata mjerenja. Iz ove vrijednosti se može procjeniti koliko dobro tačke interpolirane polinomom X_a aproksimiraju stvarne rezultate kalibracije.

Relativna greška interpolacije se računa pomoću izraza [3]:

$$f_c = \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \cdot 100 \quad \dots (2)$$

gdje je:

\bar{X}_r – srednja vrijednost očitavanja iz serija sa rastućom silom (X_1, X_3, X_5)

X_a – vrijednost dobivena na temelju interpolacije za pojedinu kalibracionu tačku

5. IZBOR OPTIMALNOG STEPENA POLINOMA

U tabeli br 4 dati su rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN u području pritiska. Za svaki mjerni niz izmjerene su vrijednosti u deset kalibracionih tačaka.

Tabela 4. Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Sila kN	Pozicija etalona 0 ⁰ mV/V		Pozicija etalona 120 ⁰ mV/V		Pozicija etalona 240 ⁰ mV/V	
	X1	X2	X3	X4'	X5	X6'
0	0,00000	0,00000	0,00000	-	0,00000	-
20	0,20001	0,20003	0,20001	0,19988	0,20002	0,19986
40	0,40002	0,40005	0,40003	0,39995	0,40003	0,39990
60	0,60001	0,60006	0,60004	0,60008	0,60004	0,60003
80	0,80005	0,80008	0,80007	0,80017	0,80008	0,80015
100	1,00008	1,00011	1,00011	1,00033	1,00011	1,00027
120	1,20024	1,20030	1,20030	1,20049	1,20025	1,20039
140	1,40030	1,40038	1,40036	1,40052	1,40034	1,40045
160	1,60045	1,60054	1,60054	1,60066	1,60051	1,60057
180	1,80054	1,80063	1,80066	1,80073	1,80058	1,80061
200	2,00072	2,00079	2,00085	-	2,00075	-

Rezultati kalibracije pokazuju vezu između primjenjene sile i očitane promjene napona u mV/V što se može prikazati polinomom određenog stepena. Postavlja se pitanje koji stepen polinoma je optimalan za aproksimaciju. U nastavku su date jednačine interpolacije polinoma prvog, drugog, trećeg, četvrtog i petog stepena na temelju srednjih vrijednosti očitavanja X_1, X_3 i X_5 i izračunati su pripadajući koeficijenti. Na osnovu izračunatih koeficijenata jednačine

proračunate su greške interpolacije za polinome različitih stepena i izvršen optimalan izbor stepena polinoma.

Najjednostavniji je polinom prvog stepena kod kojeg će odstupanje biti najveće, odnosno pravac koji se još naziva i linearizacijom. Slijedeća jednačina prikazuje rezultate kalibracije pravcem:

$$Y1 = A \cdot X \quad \dots (3)$$

$$A=1,0002845455E-02$$

Polinomom drugog stepena dobija se složenija jednačina kalibracije data izrazom:

$$Y2 = A \cdot X^2 + B \cdot X \quad \dots (4)$$

$$A=2,3980771571E-08; B=9,9990770476E-03$$

Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena data je jednačinom:

$$Y3 = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X \quad \dots (5)$$

$$A=4,3326674849E-12; B=2,2774932794E-08; C=9,9991525007E-03$$

Kriva kalibracije opisana polinomom četvrtog stepena data je jednačinom:

$$Y4 = A \cdot X^4 + B \cdot X^3 + C \cdot X^2 + D \cdot X \quad \dots (6)$$

$$A=-1,1368177526E-12; B=4,4698736726E-10; C=-2,9719890215E-08;$$

$$D=1,0000967385E-02$$

Kriva kalibracije opisana polinomom petog stepena data je jednačinom:

$$Y5 = A \cdot X^5 + B \cdot X^4 + C \cdot X^3 + D \cdot X^2 + E \cdot X \quad \dots (7)$$

$$A=1,7767506250E-14; B=-9,9391930233E-12; C=1,9607065763E-09$$

$$D=1,3385647346E-07; E=1,0003272600E-02$$

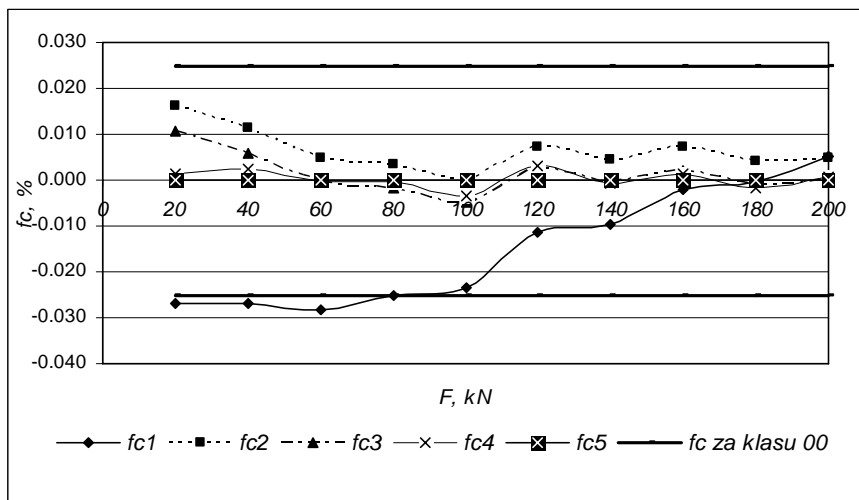
U tabeli 5 uporedno je prikazano relativno interpolacijsko odstupanje, izračunato prema jednačini 2 za svaki stepen polinoma na temelju istih srednjih vrijednosti očitavanja mjernih nizova kod povećanja sile (X1, X3 i X5). Standard ISO 376 za klasifikaciju etalona daje vrijednost interpolacijskog odstupanja na tri decimalna mjesta. Zbog tumačenja procjenjenih vrijednosti i uočavanja razlika za polinome različitog stepena dato je interpolacijsko odstupanje zaokruženo na pet decimalnih mjesta.

Tabela 5. Relativno interpolacijsko odstupanje za polinome različitog stepena

Sila kN	Xr mV/V	Relativno interpolacijsko odstupanje, %				
		f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}
20	0,20001	-0,02678	0,01610	0,01057	0,00124	-0,00001
40	0,40003	-0,02678	0,01130	0,00596	0,00246	-0,00001
60	0,60003	-0,02845	0,00484	-0,00035	-0,00048	-0,00002
80	0,80007	-0,02511	0,00338	-0,00169	-0,00035	-0,00002
100	1,00010	-0,02345	0,00025	-0,00473	-0,00328	-0,00003
120	1,20026	-0,01151	0,00740	0,00247	0,00321	-0,00003
140	1,40033	-0,00964	0,00447	-0,00045	-0,00067	-0,00004
160	1,60050	-0,00220	0,00711	0,00218	0,00126	-0,00004
180	1,80059	-0,00049	0,00403	-0,00096	-0,00174	-0,00005
200	2,00077	0,00521	0,00493	-0,00014	0,00058	-0,00005

Slika 4 prezentuje relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stepena u zavisnosti o kalibracionoj sili. Takođe, na slici su date i granične vrijednosti interpolacijskog

odstupanja definisane standardom ISO 376 za klasu 00 prenosnog etalona. Sa slike je vidljivo da je interpolacijsko odstupanje veće što je odgovarajuća sila manja. Takođe, kod manjih sila znatna je razlika kod interpolacijskih odstupanja različitih stepena polinoma. Budući da je za klasu 00 prenosnog etalona dozvoljeno relativno interpolacijsko odstupanje $\pm 0,025\%$ za interpolaciju rezultata mjerenja sasvim je prihvatljivo uzeti polinom trećeg stepena. Polinom prvog stepena nije dovoljan za interpolaciju kod manjih sila zbog velikog interpolacijskog odstupanja koje prelazi granične vrijednosti za klasu 00 prenosnog etalona. Polinom drugog stepena takođe nije prihvatljiv jer se približava graničnoj vrijednosti za klasu 00 prenosnog etalona kod manjih sila.



Slika 4. Relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stepena

Kalibraciona kriva dobivena na temelju srednjih vrijednosti i izračunata pomoću metode najmanjih kvadrata polinomom trećeg stepena glasi:

$$Xa=4,3326674849E-12 \cdot F^3 + 2,2774932794E-08 \cdot F^2 + 9,9991525007E-03 \cdot F \dots (8)$$

6. ZAKLJUČAK

Interpolacijsko odstupanje se povećava sa smanjenjem vrijednosti sile.

Polinom prvog stepena nije prihvatljiv jer prelazi granične vrijednosti interpolacije definisane standardom ISO 376 za klasu 00. Polinom drugog stepena takođe nije prihvatljiv jer se približava graničnoj vrijednosti za klasu 00 prenosnog etalona kod manjih vrijednosti sile.

Razlike interpolacijskog odstupanja kod polinoma trećeg, četvrtog i petog stepena nisu velike čak ni kod manjih vrijednosti sile pa se sa sigurnošću može prihvatiti polinom trećeg stepena za proračun interpolacijskog odstupanja.

7. LITERATURA

- [1] Standard ISO 376: Metallic materials – Calibration of force-proving instrument used for the verification of uniaxial testing machines; Third edition, 2004.
- [2] www.pbf.unizg.hr
- [3] EURAMET/cg-04/v.01: Uncertainty of Force Measurements, 2011.