

UNIVERZITET U ZENICI
Fakultet za metalurgiju i materijale
u Zenici

Branka Muminović, dipl.inž.

KVANTIFIKACIJA POJEDINAČNIH DOPRINOSA I
PRORAČUN PROŠIRENE MJERNE NESIGURNOSTI KOD
KALIBRACIJE PRENOSNOG ETALONA ZA SILU

Magistarski rad

Zenica, 2014. godine

UNIVERZITET U ZENICI
Fakultet za metalurgiju i materijale

KLJUČNE DOKUMENTACIJSKE INFORMACIJE

Vrsta rada: Magistarski rad

Autor: Branka Muminović, dipl.inž.

Index br.: 169/08

Mentor rada: prof. dr. Mirsada Oruč, redovni profesor

Naslov rada: „Kvantifikacija pojedinačnih doprinosa i proračun proširene mjerne nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona za silu“

Jezik publikacije: Bosanski

Jezik kratkog sadržaja: Bosanski/Engleski

Zemlja publikovanja: Bosna i Hercegovina

Godina izdanja: 2014.

Izdavač: Fakultet za metalurgiju i materijale

Adresa: Travnička cesta br. 1, 72 000 Zenica

E-mail: fam@famm.unze.ba

Fizički opis rada:

Broj poglavlja	6
Broj stranica	85
Broj tabela	63
Broj slika	73
Broj priloga	2

Naučna oblast: Tehničke nauke, Materijali, Metalni materijali, Karakterizacija materijala

Ključne riječi: sila, prenosni etalon sile, sljedivost mjerenja, kalibracija, mjerna nesigurnost najbolja mjerna mogućnost laboratorija

UDK oznaka univerzitetske biblioteke: UDK 531.781.088/.089(043.2)

Rad je izrađen u 12 primjeraka

Vrijeme odbrane rada: 02.06.2014. godine

ZAHVALA

Svima, koji su mi na bilo koji način pomogli prilikom izrade ovoga rada, od srca veliko hvala.

Posebno se zahvaljujem mentoru prof. dr. Mirsadi Oruč i komentoru doc. dr. Razi Sunulahpašić na korisnim savjetima, pruženoj pomoći i podršci te velikom razumijevanju i uloženom trudu da ovaj rad zadovolji formu i suštinu.

Veliku zahvalnost dr. Željku Alaru i zaposlenicima Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta za strojarstvo i brodogradnju, Sveučilišta u Zagrebu na pomoći kod realizacije dijela praktičnog rada.

Branka Muminović

BIOGRAFIJA

Branka Muminović je rođena 17.03.1966. godine u Zenici. Osnovnu školu „Sestre Ditrh“ u Zenici završila je 1980. godine, nakon čega nastavlja srednjoškolsko obrazovanje u Gimnaziji „29. novembar“ u Zenici. Metalurški fakultet u Zenici upisuje u školskoj 1984/85 godini, a na istom fakultetu diplomira u januaru 1989. godine. Od završetka fakulteta zaposlena je na Metalurškom institutu „Kemal Kapetanović“, u početku u Zavodu za rude i gvožđe a zatim u Zavodu za fizičku metalurgiju u Mehaničkom laboratoriju kao inženjer istraživač. Od novembra 2008. godine radi na mjestu rukovodioca/tehničkog rukovodioca u Mehaničkom laboratoriju. U okviru postdiplomskog studija „Metalni materijali“ na Fakultetu za metalurgiju i materijale u Zenici, nakon što je položila sve ispite, odobrena joj je tema za izradu magistarskog rada pod naslovom „Kvantifikacija pojedinačnih doprinosa i proračun proširene mjerne nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona za silu“. Autor je i koautor većeg broja naučno-istraživačkih i stručnih radova. Član je Komiteta akreditovanih laboratorija i tehnički ekspert za ocjenu kompetentnosti ispitnih i kalibracionih laboratorija pri Institutu za akreditiranje Bosne i Hercegovine. Služi se engleskim jezikom.

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI RADA

Magistarski rad na temu „Kvantifikacija pojedinačnih doprinosa i proračun proširene mjerne nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona za silu“ izrađen je prema Odluci Fakulteta za metalurgiju i materijale u Zenici broj 02-200-303-0785/11 od 13.10.2011. godine i predat je Komisiji za odbranu magistarskog rada.

Navedeni magistarski rad izradila sam samostalno uz pomoć mentora red. prof. dr. sc. Mirsade Oruč, dipl.inž. i komentora doc.dr. Raze Sunulahpašić, dipl.inž., te koristeći se navedenom literaturom.

Izjavu dala:

Branka Muminović, dipl.ing.

KVANTIFIKACIJA POJEDINAČNIH DOPRINOSA I PRORAČUN PROŠIRENE MJERNE NESIGURNOSTI KOD KALIBRACIJE PRENOSNOG ETALONA ZA SILU

Sažetak

Mjerenje sile je osnova za određivanje mehaničkih karakteristika materijala ili gotovog proizvoda. U cilju dobijanja što kvalitetnijih rezultata mjerenja, povećavaju se zahtjevi sa aspekta korištenih ispitnih mašina za mjerenje sile i njihove stalne provjere, odnosno kalibracije sa uređajima višeg nivoa u piramidi sljedivosti sile. Jedan od bitnih parametara osiguranja kvaliteta sljedivosti rezultata mjerenja sile je procjena i proračun vrijednosti mjernih nesigurnosti koje su proizišle iz uticajnih veličina na samo mjerenje. Na mjernu nesigurnost utiču parametri koji se mogu kvantificirati, odnosno procijeniti na temelju ponavljanja mjerenja i svih ostalih raspoloživih podataka koji mogu biti korisni u toj procjeni. Procijenjena mjerna nesigurnost uređaja koji se koriste za kalibraciju ispitnih mašina za mjerenje sile je jedan od doprinosa za procjenu nesigurnosti ispitnih mašina i procjenu najbolje mjerne mogućnosti laboratorija.

Ključne riječi: sila, prenosni etalon sile, sljedivost mjerenja, kalibracija, mjerna nesigurnost, najbolja mjerna mogućnost

QUANTIFICATION OF INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS AND CALCULATION OF EXPANDED MEASUREMENT UNCERTAINTY DURING CALIBRATION OF FORCE TRANSFER STANDARD

Summary

Measurement of force is the basis for determining the mechanical properties of materials or finished product. In order to obtain the quality measurement results, requirements are increased in terms of testing machines used to measure the forces and their constant checking or calibration with force-proving instruments with a higher level in the pyramid of force traceability. One of the significant parameters for ensuring the traceability of force measurements results is the estimation and calculation of measurement uncertainty due to influence quantities on the measurement itself. Measurement uncertainty is affected by parameters that can be quantified or estimated on the basis of repeated measurements and all other available information which may be useful in the assessment. The estimated uncertainty of measurement of force-proving instruments used for the calibration of testing machines for measuring force is one of the contribution for estimation of uncertainty of testing machines and for estimation of the Calibration Measurement Capability of laboratories.

Key words: force, force transfer standard, traceability of measurement, calibration, measurement uncertainty, calibration measurement capability

SKRAĆENICE

Oznaka	Značenje
b	<i>relativna greška obnovljivosti sa rotacijom</i>
b'	<i>relativna greška ponovljivosti bez rotacije</i>
q	<i>relativna greška tačnosti</i>
f_c	<i>relativna greška interpolacije</i>
f_o	<i>relativna greška nule</i>
v	<i>relativna greška reverzibilnosti (histereze)</i>
r	<i>rezolucija indikatora</i>
a	<i>relativna rezolucija</i>
μ	<i>"stvarna" vrijednost</i>
n	<i>veoma veliki broj ponovljenih mjerenja ($n \rightarrow \infty$)</i>
x_i	<i>rezultati pojedinih mjerenja</i>
x_{sr}	<i>srednja ili aritmetička vrijednost</i>
d_i	<i>devijacija</i>
F_i	<i>sila indicirana na ispitnom uređaju kod povećanja sile iste mjerne serije</i>
F_i'	<i>sila indicirana na ispitnom uređaju kod smanjenja sile iste mjerne serije</i>
n	<i>broj očitavanja na svakom nominalnom nivou sile (mjerna tačka)</i>
F_j	<i>vrijednost sile mjerene na prenosnom etalonu</i>
$\bar{F}$	<i>srednja vrijednost mjerenja F_j, $j=3$</i>
F_{ij}	<i>vrijednost sile mjerene na kalibrisanom uređaju</i>
$\bar{F}_i$	<i>srednja vrijednost mjerenja F_{ij}, $j=3$</i>
$X1, X2, X3, X5$	<i>mjerne serije sa rastućom silom</i>
$X4', X6'$	<i>mjerne serije sa opadajućom silom</i>
X_{max}	<i>maksimalno pokazivanje od mjernih serija sa rastućom silom</i>
X_{min}	<i>minimalno pokazivanje od mjernih serija sa rastućom silom</i>
X_r	<i>srednja vrijednost očitavanja kod serija sa rastućom silom</i>
X_{wr}	<i>srednja vrijednost od mjernih serija sa rastućom silom kod 0^0 pozicije etalona</i>
X_a	<i>vrijednost dobijena na temelju interpolacije</i>
i_f	<i>očitanja vrijednost signala nakon uklanjanja sile</i>
i_o	<i>očitanja vrijednost signala prije primjene sile</i>
X_N	<i>signal koji odgovara maksimalnoj kalibracionoj sili</i>
Y	<i>mjerena veličina ili izlazna veličina</i>
U	<i>proširena mjerna nesigurnost</i>
P	<i>nivo povjerenja</i>
k	<i>faktor prekrivanja</i>
u_b	<i>relativna standardna nesigurnost vezana za obnovljivost sa rotacijom</i>
$u_{b'}$	<i>relativna standardna nesigurnost vezana za ponovljivost bez rotacije</i>
u_{res}	<i>relativna standardna nesigurnost vezana za rezoluciju indikatora</i>

u_v	<i>relativna standardna nesigurnost vezana za reverzibilnost ili histerezu</i>
u_{f0}	<i>relativna standardna nesigurnost vezana za drift nule</i>
u_t	<i>relativna standardna nesigurnost vezana za varijaciju temperature</i>
u_{fc}	<i>relativna standardna nesigurnost vezana za interpolaciju</i>
u_{rep}	<i>relativna standardna nesigurnost vezana za ponovljivost ispitne mašine</i>
u_{cal}	<i>standardna nesigurnost prenosnog etalona sile</i>
u_{drift}	<i>standardna nesigurnost zbog drifta</i>
d	<i>drift</i>
X_{last}	<i>srednja vrijednost očitavanja, za odgovarajuću silu, koja je dobivena pri posljednjoj kalibraciji prenosnog etalona</i>
X_{prev}	<i>srednja vrijednost očitavanja, za odgovarajuću silu, koja je dobivena pri prethodnoj kalibraciji prenosnog etalona</i>
u_{cim}	<i>kombinovana nesigurnost procijenjena iz rezultata kalibracije ispitne mašine</i>
c_i	<i>koeficijent osjetljivosti</i>
u_{cpet}	<i>standardna kombinovana nesigurnost procijenjena iz rezultata kalibracije prenosnog etalona</i>
u_{ref}	<i>standardna nesigurnost referentnog etalona</i>
u_c	<i>kombinovana nesigurnost prenosnog etalona</i>
F	<i>sila</i>
CMC	<i>Calibration Measurement Capability – Kalibraciona mjerna mogućnost</i>
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - Vodič za procjenu mjerne nesigurnosti</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization – Međunarodna organizacija za standarde</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission – Međunarodna komisija za elektrotehniku</i>
OIML	<i>International Organization for Legal Metrology - Međunarodna organizacija za zakonsko mjeriteljstvo</i>
CIPM	<i>Comité international des poids et mesures – Međunarodni komitet za utege i mjere</i>
CGPM	<i>Conférence Générale des Poids et Mesures - Generalna konferencija za tegove i mjere</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry - Međunarodni savez za opštu i primijenjenu hemiju</i>

INDEKS SLIKA

Broj	Naziv	Stranica
I-1	<i>Ideja o ispitivanju zatezne čvrstoće žice, Leonardo da Vinci</i>	1
I-2	<i>Ispitivanje nosivosti grede, Galileo Galilei</i>	1
I-3	<i>Lanac mjerne sljedivosti</i>	3
I-4	<i>Piramida sljedivosti</i>	6
I-5	<i>Primarni nacionalni etalon sile od 1MN</i>	7
I-6	<i>Referentni etaloni sile sa direktnim opterećenjem tegovima, a) od 100 kN, b) od 25 kN</i>	8
I-7	<i>Tipovi elastičnih elemenata i njihova uobičajena dopuštena opterećenja</i>	9
I-8	<i>Tipovi mjernih traka, a) Linearne trake, T-rozete, dvostruke smičuće trake, b) Mjerne trake proizvođača HBM</i>	10
I-9	<i>Položaj mjernih traka u Wheatstonovom mostu</i>	10
I-10	<i>Mjerne ćelije za silu sa mjernim trakama</i>	11
I-11	<i>Univerzalna hidraulična mašina za statička ispitivanja – kidalica od 200kN</i>	12
I-12	<i>Pozicije etalona kod kalibracije</i>	15
I-13	<i>Procedura kalibracije u skladu sa BAS EN ISO 376:2005</i>	15
I-14	<i>Kriva kalibracije</i>	16
I-15	<i>Rasipanje rezultata mjerenja</i>	17
I-16	<i>Relativna greška nule</i>	18
I-17	<i>Greška histereze ili reverzibilnosti</i>	19
I-18	<i>Grafički prikaz vrijednosti, greške i nesigurnosti</i>	22
I-19	<i>Interval nesigurnosti procjene mjerene veličine</i>	23
I-20	<i>Normalna raspodjela mjerenih vrijednosti</i>	26
I-21	<i>Statistička analiza očitanih vrijednosti</i>	27
I-22	<i>Histogram šest diskretnih rezultata mjerenja jedne veličine</i>	27
I-23	<i>Normalna ili Gauss-ova kriva raspodjele</i>	27
I-24	<i>Pravougaona raspodjela</i>	29
I-25	<i>Trapezna raspodjela</i>	30
I-26	<i>Trougaona raspodjela</i>	30
I-27	<i>Grafički prikaz normalne raspodjele za karakteristične vrijednosti faktora k</i>	32
II-1	<i>Mjerne ćelije za silu, a) Mjerna ćelija od 200 kN, b) Mjerna ćelija od 500 kN</i>	43
II-2	<i>Kućište mjerne ćelije za silu</i>	44
II-3	<i>Pojačivački sistem MGCplus</i>	44
II-4	<i>GTM referentna mašina</i>	45
II-5	<i>Dvostruko složene mjerne ćelije</i>	45
II-6	<i>Priprema prenosnog etalona za kalibraciju</i>	46
II-7	<i>Pozicionirana mjerna ćelija u referentnoj mašini</i>	46
II-8	<i>GTM Force manager</i>	46
II-9	<i>Pristroji kod pozicioniranja mjernih ćelija u referentnu mašinu</i>	47

II-10	Kriva kalibracije opisana polinomom prvog stepena, MGCplus-Z4/200 kN područje pritiska	49
II-11	Kriva kalibracije opisana polinomom drugog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	49
II-12	Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	50
II-13	Kriva kalibracije opisana polinomom četvrtog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	50
II-14	Kriva kalibracije opisana polinomom petog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	50
II-15	Inverzna kriva interpolacije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	51
II-16	Relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	53
II-17	Relativna odstupanja u zavisnosti od sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	54
II-18	Doprinos standardnih nesigurnosti u zavisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	59
II-19	Doprinos u_{ref} i u_{cpet} kombinovanoj nesigurnosti u ovisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	60
II-20	Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja	63
II-21	Prikaz rezultata kalibracije preko inverzne interpolacione jednačine, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja	63
II-22	Procijenjena relativna odstupanja u zavisnosti od sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja	66
II-23	Doprinos standardnih nesigurnosti u ovisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja	66
II-24	Doprinos u_{ref} i u_{cpet} kombinovanoj nesigurnosti u ovisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanje	67
II-25	Relativno odstupanje u zavisnosti od sile, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	68
II-26	Doprinos standardnih nesigurnosti u zavisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	68
II-27	Doprinos u_{ref} i u_{cpet} kombinovanoj nesigurnosti u ovisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	69
II-28	Doprinos u_{ref} i u_{cpet} kombinovanoj nesigurnosti u ovisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja	70
II-29	Uporedni prikaz relativnog odstupanja ponovljivosti, MGCplus-Z4/200 kN	71
II-30	Uporedni prikaz relativnog odstupanja obnovljivosti, MGCplus-Z4/200 kN	71
II-31	Uporedni prikaz relativnog odstupanja histereze, MGCplus-Z4/200 kN	71
II-32	Uporedni prikaz relativnog odstupanja interpolacije, MGCplus-Z4/200 kN	72
II-33	Uporedni prikaz relativnog odstupanja ponovljivosti, MGCplus-Z4/500 kN	73
II-34	Uporedni prikaz relativnog odstupanja obnovljivosti, MGCplus-Z4/500 kN	73
II-35	Uporedni prikaz relativnog odstupanja histereze, MGCplus-Z4/500 kN	74
II-36	Uporedni prikaz relativnog odstupanja interpolacije, MGCplus-Z4/500 kN	74
II-37	Uporedni prikaz proširene mjerne nesigurnosti, MGCplus-Z4/200 kN	75
II-38	Uporedni prikaz proširene mjerne nesigurnosti, MGCplus-Z4/500 kN	75

II-39	<i>Kidalice 20 SZBDA i 50 SZBDA</i>	77
II-40	<i>Pozicionirana mjerna ćelija u kidalici</i>	77
II-41	<i>Uporedne vrijednosti nesigurnosti kod kalibracije analogne skale i pokazivanja softvera – kidalica 20 SZBDA</i>	81
II-42	<i>Uporedne vrijednosti nesigurnosti kod kalibracije analogne skale i pokazivanja softvera – kidalica 50 SZBDA</i>	81
A-1	<i>Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/500 kN - područje pritiska</i>	Prilog A/2
A-2	<i>Inverzna kriva interpolacije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/500 kN - područje pritiska</i>	Prilog A/3
A-3	<i>Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/500kN - područje zatezanja</i>	Prilog A/8
A-4	<i>Inverzna kriva interpolacije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/500 kN - područje zatezanja</i>	Prilog A/8

INDEKS TABELA

Broj	Naziv	Stranica
I-1	<i>Približni faktori konverzije za neke ne-Si jedinice sile</i>	1
I-2	<i>Referentni etaloni prema mehanizmu opterećenja i odgovarajuće kalibracione mjerne mogućnosti</i>	8
I-3	<i>Uporedne vrijednosti kriterija za klasifikaciju prenosnih etalona</i>	13
I-4	<i>Kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona sile</i>	20
I-5	<i>Faktori prekrivanja k za odgovarajuće nivoe povjerenja za normalnu raspodjelu</i>	32
I-6	<i>Relativne standardne i proširene mjerne nesigurnosti za specificirane klase etalona</i>	36
II-1	<i>Tehničke karakteristike mjernih ćelija za silu od 200 kN i 500 kN</i>	43
II-2	<i>Podaci o konekcionim kablovima</i>	44
II-3	<i>Karakteristike referentne mašine</i>	45
II-4	<i>Izmjerene vrijednosti signala i relativno odstupanje nula vrijednosti kod predopterećenja, MGCplus-Z4/200 kN - područje pritiska</i>	47
II-5	<i>Izmjerene vrijednosti i relativno odstupanje nule kod mjernih nizova, MGCplus-Z4/200 kN - područje pritiska</i>	47
II-6	<i>Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska</i>	48
II-7	<i>Relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska</i>	48
II-8	<i>Relativno interpolacijsko odstupanje za polinome različitog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska</i>	51
II-9	<i>Interpolirane vrijednosti prema interpolacionoj jednačini, MGCplus-Z4/200 kN-područje pritiska</i>	52
II-10	<i>Relativno interpolacijsko odstupanje (zaokružene vrijednosti na tri decimalna mjesta) za polinome različitog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska</i>	53
II-11	<i>Procijenjeni kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN-područje pritiska</i>	54
II-12	<i>Standardne nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska</i>	58
II-13	<i>Vrijednosti u_{cpet}, u_{ref} i u_c po kalibracionim tačkama, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska</i>	60
II-14	<i>Klasifikacija etalona i pripadajuća proširena nesigurnost, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska</i>	60
II-15	<i>Izmjerene vrijednosti signala i relativno odstupanje nula vrijednosti kod predopterećenja, MGCplus-Z4/200 kN-područje zatezanja</i>	61
II-16	<i>Izmjerene vrijednosti nula signala i relativno odstupanje nule kod mjernih nizova, MGCplus-Z4/200 kN-područje zatezanja</i>	61
II-17	<i>Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja</i>	62
II-18	<i>Procijenjena relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja</i>	62
II-19	<i>Interpolirane vrijednosti, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja</i>	64
II-20	<i>Procijenjeni kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja</i>	64

II-21	Standardne nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja	65
II-22	Vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} , i u_c po pojedinim kalibracionim tačkama, MGCplus-Z4/200 kN-područje zatezanja	65
II-23	Klasifikacija i proširena mjerna nesigurnost, MGCplus-Z4/200 kN-područje zatezanja	65
II-24	Relativna odstupanja uporedo kod kalibracije u području pritiska i području zatezanja, MGCplus-Z4/200 kN	70
II-25	Uporedne vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} , u_c , U i klasifikacija etalona u ovisnosti o sili, MGCplus-Z4/200 kN	72
II-26	Relativna odstupanja uporedo kod kalibracije u području pritiska i području zatezanja, MGCplus-Z4/500 kN	73
II-27	Uporedne vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} , u_c , U i klasifikacija etalona u ovisnosti o sili, MGCplus-Z4/500 kN	75
II-28	Proširene mjerne nesigurnosti prenosnih etalona	76
II-29	Osnovni parametri kod kalibracije kidalice 20 SZBDA i 50 SZBDA	77
II-30	Rezultati kalibracije analogne skale kidalice 20 SZBDA	78
II-31	Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost – analogna skala kidalice 20 SZBDA	78
II-32	Rezultati kalibracije pokazivanja softvera kidalice 20 SZBDA	79
II-33	Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost - pokazivanje softvera kidalice 20 SZBDA	79
II-34	Uporedne vrijednosti nesigurnosti kod kalibracije analogne skale i kalibracije pokazivanja softvera – kidalice 20 SZBDA	80
II-35	Uporedne vrijednosti nesigurnosti kod kalibracije analogne skale i kalibracije pokazivanja softvera – kidalice 50 SZBDA	80
A-1	Izmjerene vrijednosti signala i relativno odstupanje nule kod predopterećenja, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	Prilog A/1
A-2	Izmjerene vrijednosti i relativno odstupanje nule kod mjernih nizova, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	Prilog A/1
A-3	Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN - područje pritiska	Prilog A/1
A-4	Relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	Prilog A/2
A-5	Interpolirane vrijednosti prema interpolacionoj jednačini, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	Prilog A/3
A-6	Procijenjeni kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	Prilog A/4
A-7	Standardne nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	Prilog A/5
A-8	Vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} , i u_c po kalibracionim tačkama, MGCplus-Z4/500kN-područje pritiska	Prilog A/5
A-9	Klasifikacija etalona i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska	Prilog A/6
A-10	Izmjerene vrijednosti signala i procijenjeno relativno odstupanje nule kod predopterećenja, MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja	Prilog A/6
A-11	Izmjerene vrijednosti nul signala i relativno odstupanje nule kod mjernih nizova, MGCplus-Z4/500 kN-područje zatezanja	Prilog A/6

A-12	<i>Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja</i>	<i>Prilog A/7</i>
A-13	<i>Relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja</i>	<i>Prilog A/7</i>
A-14	<i>Interpolirane vrijednosti, MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja</i>	<i>Prilog A/9</i>
A-15	<i>Procijenjeni kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja</i>	<i>Prilog A/10</i>
A-16	<i>Standardne nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije, MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja</i>	<i>Prilog A/10</i>
A-17	<i>Vrijednosti u_{cpet}, u_{ref} i u_c po pojedinim kalibracionim tačkama, MGCplus-Z4/500 kN-područje zatezanja</i>	<i>Prilog A/11</i>
A-18	<i>Klasifikacija etalona i pripadajuća proširena mjerna nesigurnost</i>	<i>Prilog A/11</i>
B-1	<i>Rezultati kalibracije analogne skale kidalice 50 SZBDA</i>	<i>Prilog B/1</i>
B-2	<i>Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost – analogna skala kidalice 50 SZBDA</i>	<i>Prilog B/1</i>
B-3	<i>Rezultati kalibracije pokazivanja softvera – pokazivanje softvera kidalice 50 SZBDA</i>	<i>Prilog B/2</i>
B-4	<i>Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost - pokazivanje softvera kidalice 50 SZBDA</i>	<i>Prilog B/2</i>

SADRŽAJ

	UVOD	1
I	TEORETSKI DIO	2
1.	SILA KAO MJERNA VELIČINA	2
1.1	Mjerenje sile	2
1.2	Sljedivost mjerenja	3
1.3	Osiguranje sljedivosti	5
2.	KALIBRACIJA PRENOSNIH ETALONA SILE	13
2.1	Procedura kalibracije prenosnih etalona prema standarda BAS ISO 376	14
2.2	Kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona	17
2.2.1	Relativne greške prenosnog etalona koje se računaju iz rezultata kalibracije	18
2.2.2	Nesigurnost primijenjene kalibracione sile, odnosno kalibraciona mjerna mogućnost referentnog etalona	20
2.3	Princip klasifikacije	20
3.	MJERNA NESIGURNOST	21
3.1	Izvori mjerne nesigurnosti	26
3.2	Statistički temelj za procjenu mjerne nesigurnosti	26
3.3	Postupak za procjenu mjerne nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona sile (EA4-02, EURAMET cg-4)	34
4.	KALIBRACIONA MJERNA MOGUĆNOST LABORATORIJA-CMC	36
4.1	Procedura za procjenu CMC	37
4.1.1	Procjena kombinovane nesigurnosti vezane za prenosni etalon, u_{cpet}	38
4.1.2	Izvođenje eksperimenta – kalibracija ispitne mašine za silu	38
4.1.3	Određivanje relativnih grešaka procijenjenih iz rezultata kalibracije ispitne mašine i procjena pripadajućih nesigurnosti	39
4.1.4	Određivanje kombinovane nesigurnosti	40
4.1.5	Određivanje proširene nesigurnosti U	41
II	EKSPERIMENTALNI DIO	42
5.	PLAN EKSPERIMENTALNOG RADA	42
5.1	Kalibracija prenosnih etalona sile MGCplus-Z4/200 kN i MGCplus-Z4/500 kN	42
5.1.1	Procedura pripreme prenosnog etalona za kalibraciju	45
5.1.2	Procedura kalibracije prenosnog etalona za silu	46

5.1.2.1	Kalibracija prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	47
5.2	Procjena relativnih grešaka i izbor optimalnog stepena polinoma kod kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	48
5.2.1	Interpretacija rezultata	52
5.3	Procjena kriterija za ocjenjivanja prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN - kalibracija u području pritiska	53
5.3.1	Interpretacija rezultata	54
5.4	Kvantifikacija standardnih doprinosa mjernoj nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN - područje pritiska	55
5.4.1	Interpretacija rezultata	59
5.5	Procjena kombinovane i proširene mjerne nesigurnosti prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska	59
5.5.1	Interpretacija rezultata	60
5.6	Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN - područje zatezanja	61
5.6.1	Interpretacija rezultata	65
5.7	Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN	67
5.7.1	Interpretacija rezultata	68
5.8	Mogućnost korištenja prenosnog etalona koji je kalibrisan u jednom području za kalibraciju ispitnih mašina i u području pritiska i u području zatezanja	70
5.8.1	Rezultati poređenja prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN	70
5.8.2	Rezultati poređenja prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN	72
5.9	Procjena kalibracione mjerne mogućnosti (CMC) Mehaničkog kalibracionog laboratorija za mjereno područje od 20 kN do 500 kN	76
5.9.1	Interpretacija rezultata	80
6.	ZAKLJUČCI	82
	LITERATURA	84
	PRILOZI	86

UVOD

Jedan od važnih parametara osiguranja kvaliteta sljedivosti rezultata mjerenja sile je procjena i proračun vrijednosti mjernih nesigurnosti koje su proizišle iz uticajnih veličina na samo mjerenje. Osnovni cilj ovog rada je odrediti koji su to uticajni faktori na mjernu nesigurnost kod kalibracije prenosnog etalona sile, uspostaviti model za procjenu i proračun kvantitativnih vrijednosti tih uticaja, te na osnovu dobijenih vrijednosti i provedenog eksperimenta odrediti kalibracionu mjernu mogućnost laboratorija.

Zadatak istraživanja je bio da se kalibrišu prenosni etaloni sile u mjernom lancu sa pojačivačkim sistemom MGCplus, procijene relativne greške, kvantificiraju standardni doprinosi mjernoj nesigurnosti, procijeni kombinovana i proširena mjerna nesigurnost, te da se na bazi provedenog eksperimenta odredi kalibraciona mjerna mogućnost Mehaničkog laboratorija.

U teoretskom dijelu rada obrađena su tri primarna područja: sljedivost mjerenja, mjerna nesigurnost i kalibraciona mjerna mogućnost laboratorija. U području sljedivosti mjerenja date su osnove osiguranja sljedivosti sa osvrtom na sljedivost sile do nacionalnog etalona. U području mjerne nesigurnosti dat je statistički temelj za procjenu nesigurnosti i postupak za procjenu mjerne nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona sile. U trećem području, opisana je procedura za procjenu kalibracione mjerne mogućnosti laboratorija i procijenjene su standardne, odnosno kombinovana i proširena mjerna nesigurnost na temelju provedenog eksperimenta.

Praktični dio, u okviru eksperimentalnog dijela rada, je obavljen na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje na referentnoj GTM-ovoj mašini i u Mehaničkom laboratoriju Metalurškog instituta “Kemal Kapetanović” Zenica. U okviru ovog dijela realizovana je kalibracija prenosnih etalona sile MGCplus-Z4/200 kN i MGCplus-Z4/500 kN. Kalibracija je izvršena u području pritiska i području zatezanja u deset kalibracionih tačaka u skladu sa standardom BAS EN ISO 376:2005. U ovom dijelu rada dati su rezultati kalibracije, procijenjene su relativne greške, izvršen izbor optimalnog stepena polinoma i etaloni su klasificirani u skladu sa standardom. Urađena je kvantifikacija pojedinačnih doprinosa i procijenjena kombinovana i proširena mjerna nesigurnost. Na osnovu dobijenih rezultata potvrđena je mogućnost korištenja prenosnih etalona za kalibraciju uređaja za zadavanje sile u području pritiska i području zatezanja. Na kraju, na osnovu procijenjene nesigurnosti prenosnih etalona i provedenog eksperimenta određena je kalibraciona mjerna mogućnost Mehaničkog laboratorija za mjerno područje sile od 20 kN do 500 kN.

I TEORETSKI DIO

1. SILA KAO MJERNA VELIČINA

Sila je vektorska veličina određena pravcem, smjerom i intenzitetom. Oznaka za silu je $\vec{F}$, a u SI sistemu, jedinica za silu je 1 *Newton* (N). To je sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje od 1 m/s^2 . U praksi je teško postići ubrzanja od 1 m/s^2 djelujući na tijelo mase 1 kg u cilju realizacije sile od 1N, tako da se sila ostvaruje podvrgavanjem tijela mase m sili zemljine teže g , čime djeluje na potporu postignutom silom $F=m \cdot g$. Na ovakav način ostvaruje se sila u uređajima koji se direktno opterećuju tegovima. Historijski posmatrano postojalo je nekoliko jedinica za silu i neki približni faktori konverzije dati su u tabeli I-1. [1].

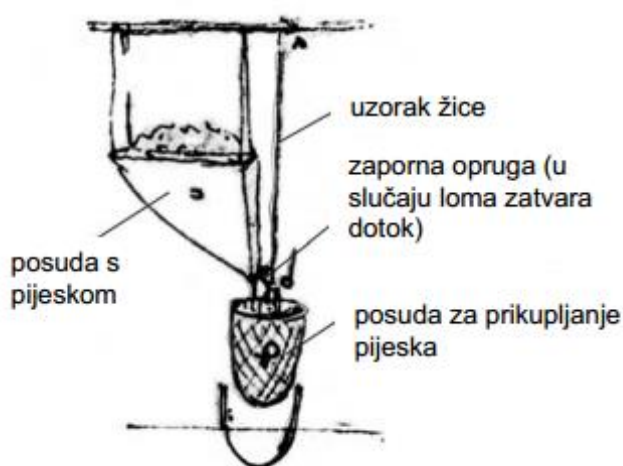
Tabela I-1. Približni faktori konverzije za neke ne-Si jedinice sile

Jedinica	Simbol	Ekvivalent
Funta sile	<i>ibf</i>	4.448 N
Tona sile	<i>tonf</i>	9.964 kN
Kilogram sile (kilopond)	<i>kgf (kp)</i>	9.807 N

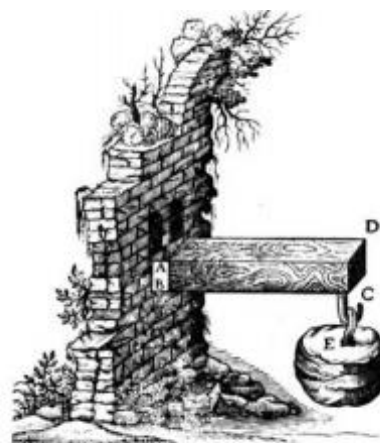
U nauci o materijalima, djelovanje sile na tijelo proučava se najviše zbog ponašanja materijala tijela a preko toga se određuju mehanička svojstva materijala. Budući da je sila vektorska veličina ona može djelovati različitim intenzitetom i na različite načine na materijal i sa tog aspekta, razlikuju se i različita opterećenja na materijal - zatezanje, pritisak, smicanje, savijanje, uvijanje, statička i dinamička opterećenja, kratkotrajna i dugotrajna opterećenja itd.

1.1 Mjerenje sile

Prvi pisani tragovi o mjerenjima sile datiraju još iz 15. vijeka kada je umjetnik Leonardo da Vinci izradio studiju o opterećenju savijanjem, koja polazi od pokušaja objašnjenja savijanja užeta preko koluta. Svoja razmišljanja o ispitivanju zatezne čvrstoće žice prikazao je skicom, slika I-1. Nakon gotovo 1000 godina Galileo Galilei je ispitao nosivost grede sa jedne strane pričvršćene na zid, slika I-2, a svoje rezultate je dao slijedećom rečenicom „Čvrstoća raste proporcionalno širini, ali sa kvadratom visine grede [2].



Slika I-1. Ideja o ispitivanju zatezne čvrstoće žice, Leonardo da Vinci [2]



Slika I-2. Ispitivanje nosivosti grede, Galileo Galilei [2]

Sila je matematički predstavljena kao vektor koji djeluje u određenoj tački. Stoga, mjerenje sile uključuje određivanje njene veličine i smjera djelovanja. Mjerenje sile može se provesti direktno ili indirektno. Direktna metoda obuhvata upoređivanje sa poznatom gravitacijskom silom tega standardne mase. Vrijednosti mase i gravitacije moraju biti tačno poznate. Ovu metodu koriste tzv. vage za mjerenje sile. Njihova osjetljivost zavisi od konstrukcijskih parametara. Indirektna metoda obuhvata mjerenje učinka sile na neko tijelo. Primjeri primjene ove metode su:

- mjerenje ubrzanja tijela sa poznatom masom koje je izloženo djelovanju sile,
- mjerenje rezultantnog učinka (deformacije) kada se silom djeluje na elastične elemente.

Metoda mjerenja ubrzanja ima ograničenu primjenu iz razloga što sila predstavlja rezultantnu silu koja se sastoji od više komponenti nepoznatih sila.

Metoda mjerenja rezultantnog učinka kada se silom djeluje na elastične elemente ima veću primjenu zbog velikog raspona mjerenja, mogućnosti kontinuiranog praćenja, jednostavne upotrebe i njihove otpornosti. Najčešće korišteni elastični elementi su: opruge i razne vrste i tipovi mjernih ćelija.

Uređaji za mjerenje sile razlikuju se zavisno od:

- primijenjene metode mjerenja,
- načina ostvarivanja opterećenja,
- namjene uređaja.

Kada se radi o uređajima za mjerenje sile, s obzirom na njihovu namjenu razlikuju se:

- uređaji sa kojima se mjeri sila – podrazumijevaju se svi uređaji sa kojima se na određenom uzorku primjenom određenog mehanizma opterećenja postiže i registruje određena veličina sile (razne vrste kidalica, prese, dinamometri),
- uređaji za kalibraciju – podrazumijevaju se svi uređaji sa kojima se postiže i registruje određena veličina sile ali je njena namjena isključivo za kalibraciju i njena tačnost i mjerna nesigurnost je uvijek za klasu bolja od uređaja sa kojima se mjeri sila.

Veza između ove dvije vrste uređaja za mjerenje sile je metoda i procedura kalibracije u cilju postizanja mjerne sljedivosti ili sljedivosti mjerenja.

1.2 Sljedivost mjerenja

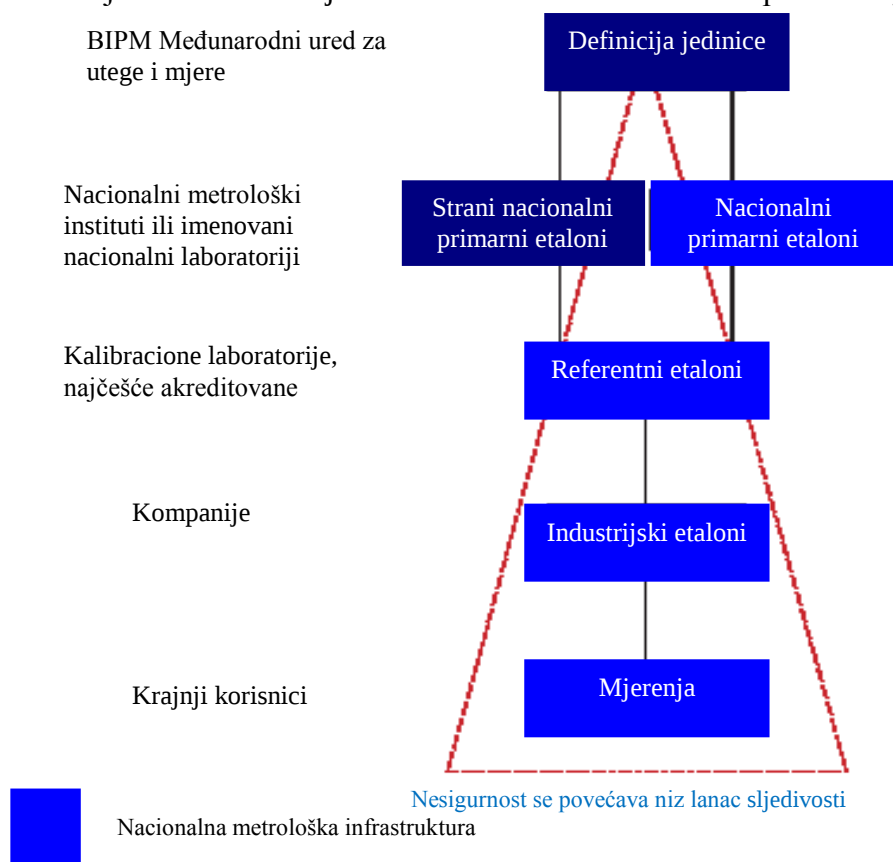
Povjerenje u rezultat mjerenja može se postići samo ostvarivanjem sljedivosti mjerenja do primarnog etalona. Prema tome, kalibracija i ispitivanje opreme za mjerenje trebaju biti u skladu sa nacionalnim mjeriteljskim normama. Sljedivost se može definisati kao „karakteristika mjernog rezultata ili vrijednosti etalona po kojem se on može dovesti u vezu sa referentnim etalonima neprekinutim lancem usporedbi koje imaju određene mjerne nesigurnosti“. U svim koracima, kalibracija se provodi etalomom čiji je metrološki kvalitet već određen kalibracijom etalona na višem mjeriteljskom nivou. Koncepcija sljedivosti može imati jedno od tri osnovna značenja [3]:

- u odnosu na proizvod - ona se odnosi na porijeklo materijala ili dijelova, ili na raspodjelu i smještaj proizvoda nakon isporuke,
- kod kalibracije - ona povezuje mjerne uređaje sa nacionalnim ili međunarodnim etalonima, primarnim etalonima, temeljnim fizičkim konstantama ili referentnim materijalom,
- u odnosu na obuhvaćene podatke - dovode se u vezu svi proračuni i podaci sa zahtjevima na kvalitet.

Sljedivost ispitivanja i mjerenja ne obuhvata samo tehničke mjere kao što je kalibracija, već i organizacijske, u realizaciji ispitivanja i mjerenja. Iz tog razloga moraju se identifikovati sve osobe koje su planirale i izvodile mjerenja ili su na neki drugi način učestvovala u njima. Prema dokumentu EAL-G12, sljedivost se sastoji od više elemenata, koji je karakterišu [4]:

- Neprekinuti lanac usporedbi, kojim se može ostvariti sljedivost do nacionalnog ili međunarodnog etalona;
- Mjerna nesigurnost se mora računati za svaki korak u lancu sljedivosti u skladu sa određenim metodama, te se mora iskazati tako da se za cijeli lanac može izračunati ukupna mjerna nesigurnost;
- Dokumentacija - svaki korak u lancu se mora provoditi u skladu sa dokumentima i opće prihvaćenim postupcima a takođe rezultati se moraju dokumentovati na isti način;
- Kompetentnost - laboratorije ili tijela koja provode jedan ili više koraka u lancu moraju imati dokaz o svojoj tehničkoj kompetentnosti, npr. dokaz o akreditaciji;
- Upućivanje na SI jedinice - lanac usporedbi mora završavati primarnim etalonima za ostvarenje SI jedinica;
- Rekalibracija - kalibracija se mora ponavljati u odgovarajućim vremenskim intervalima pri čemu dužina ovih intervala zavisi od više faktora, npr. zahtjevana nesigurnost, učestalost korištenja, način korištenja, stabilnost opreme.

Osiguranje sljedivosti postiže se kalibracijom mjerne i kalibracione opreme u laboratorijama koje mogu dokazati svoju sljedivost i osposobljenost. Ovakve laboratorije moraju imati definisan sistem za kalibraciju kompletne opreme koja podliježe kalibraciji i provoditi plan kalibracije opreme u cilju osiguranja sljedivosti mjerenja do državnog ili nacionalnog etalona. S obzirom na svoje mogućnosti, svaka zemlja će napraviti svoj sistem za osiguranje sljedivosti za konkretnu mjernu veličinu. Sljedivost na međunarodnom nivou prikazana je na slici I-3. [5].



Slika I- 3. Lanac mjerne sljedivosti [5]

Postoje slučajevi kada se ne može dokazati sljedivost rezultata mjerenja, npr. [6]:

- ako ne postoje odgovarajući etaloni višeg nivoa,
- ako ukupnoj mjernoj nesigurnosti doprinose više neki drugi izvori a ne korištena oprema,
- kod mjerenja gdje sljedivost do SI jedinica nije relevantna.

U takvim slučajevima sljedivost rezultata mjerenja može se ostvariti:

- upotrebom certificiranih referentnih materijala koji su nabavljeni od kompetentnog dobavljača u cilju dobijanja pouzdane fizičke ili hemijske karakteristike materijala,
- primjenom specificirane metode i/ili opće prihvaćenih etalona koji su potpuno opisani,
- ako je to moguće, učešćem u prikladnom programu međulaboratorijskih poređenja.

Ako kalibracioni laboratorij posjeduje vlastite primarne etalone bazirane na temelju fizičkih konstanti, sljedivost do SI jedinica može se ostvariti samo putem poređenja sa drugim sličnim etalonima nacionalnog mjeriteljskog Instituta.

1.3 Osiguranje sljedivosti

Sva oprema, koja se upotrebljava za ispitivanje i/ili kalibracije, kao i oprema za pomoćna mjerenja koja ima značajan uticaj na tačnost rezultata ispitivanja, kalibracije ili uzorkovanja, treba biti kalibrisana prije upotrebe. Laboratoriji trebaju definisati program i procedure za kalibraciju opreme. Ovaj program treba obuhvatiti sistem za izbor, upotrebu, kalibraciju, provjeravanje, kontrolisanje i održavanje mjernih etalona, referentnih materijala koji se koriste kao mjerni etaloni, te opreme za mjerenje i ispitivanje koja se upotrebljava za ispitivanje i kalibraciju. U cilju osiguranja sljedivosti do međunarodnog sistema mjernih jedinica kalibracioni laboratoriji trebaju planirati i provoditi programe kalibracije opreme. Kalibracioni laboratoriji uspostavljaju sljedivost vlastitih mjernih etalona i mjerila prema međunarodnom sistemu mjernih jedinica SI preko neprekinutog lanca kalibracija ili poređenja, povezujući ih do odgovarajućih primarnih etalona. Veza sa SI može se postići upućivanjem na nacionalne mjerne etalone koji mogu biti [6]:

- primarni koji su primarna realizacija SI jedinica ili su prihvaćeni predstavnici SI jedinica koji se temelje na temeljnim fizičkim konstantama ili upućivanjem na prirodnu konstantu čija je vrijednost preko odgovarajuće SI jedinice poznata i preporučena od Generalne konferencije za tegove i mjere CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures) i Međunarodnog komiteta za tegove i mjere CIPM (Comité international des poids et mesures),
- sekundarni koji predstavljaju etalone kalibrisane u nekom drugom nacionalnom mjeriteljskom Institutu.

Kada se koriste usluge vanjskih kalibracija, sljedivost mjerenja se mora osigurati korištenjem usluga kalibracija u laboratorijama koje mogu dokazati kompetentnost, kalibracionu mjernu mogućnost i sljedivost. Pod kompetentnim laboratorijama za kalibraciju smatraju se laboratorije koje ispunjavaju zahtjeve međunarodnog standarda BAS EN ISO/IEC 17025. Certifikati o kalibraciji, izdati od strane ovakvih laboratorija trebaju sadržavati rezultate mjerenja koji u sebi uključuju mjernu nesigurnost i/ili izjavu o ispunjavanju neke prepoznatljive metrološke specifikacije, te se trebaju odnositi samo na veličine i rezultate funkcionalnih ispitivanja. Takođe, certifikat o kalibraciji za konkretno područje, koji sadrži logotip tijela za akreditiranje dovoljan je dokaz o sljedivosti prikazanih podataka za konkretnu kalibraciju.

Mogućnosti za osiguranje sljedivosti rezultata mjerenja su sljedeće [7]:

- osiguranje sljedivosti do definicijskog etalona,
- osiguranje sljedivosti do međunarodnog etalona,
- osiguranje sljedivosti preko državne mjeriteljske ustanove,
- osiguranje sljedivosti preko akreditovanog laboratorija,
- osiguranje sljedivosti preko kalibracionog laboratorija same kompanije (in-house calibration).

Definicijski etaloni su samostalni etaloni sa visokim stepenom ponovljivosti i zasnivaju se na fizičkim zakonima. Laboratorij koji upotrebljava definicijske etalone mora osigurati procedure za osiguranje kvaliteta, učestvovati u međulaboratorijskim poređenjima ili na neki drugi način dokazati da njegovi rezultati koreliraju sa državnim ili međunarodnim etalonima.

Osiguranje sljedivosti do međunarodnog etalona može se postići:

- direktnom vezom na međunarodni etalon,
- vezom na državni etalon neke druge države,
- vezom preko etalona akreditovanog kalibracionog laboratorija van države pod uslovom da je akreditacioni organ koji je akreditovao ovakvu laboratoriju potpisnica multilaterarnog sporazuma.

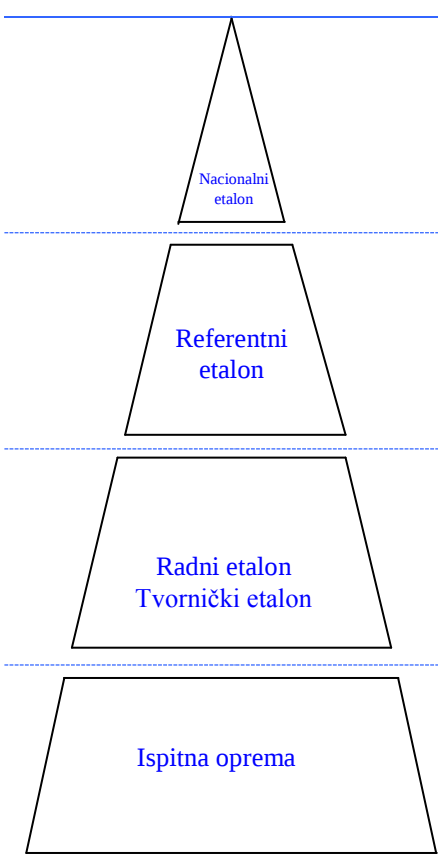
Državna mjeriteljska ustanova ima zadatak da čuva državne etalone i osigurava međunarodno poređenje i prosljeđivanje etalona korisnicima. U Bosni i Hercegovini državna mjeriteljska ustanova je Institut za mjeriteljstvo BiH, koji ostvaruje etalonsku bazu i osigurava sljedivost državnih etalona prema međunarodnim, te donosi odluke o proglašenju nacionalnih etalona. U tom smislu započet je projekat jačanja mjeriteljske infrastrukture i osnivanje laboratorija nosilaca državnih etalona u Bosni i Hercegovini. Još uvijek, Institut za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine nema laboratoriju za silu na državnom nivou, koja bi bila nosilac državnog etalona.

Pod akreditovanim kalibracionim laboratorijem podrazumjeva se laboratorij koji ispunjava zahtjeve međunarodnog standarda BAS EN ISO/IEC 17025 za kompetentnost laboratorija i koji posjeduje akreditaciju od akreditacionog organa za određenu metodu ili specifikaciju.

Osiguranje sljedivosti preko kalibracionog laboratorija u samoj kompaniji (in-house calibration) podrazumjeva da se sva oprema, koja se koristi za mjerenje, kalibriše u laboratoriji unutar kompanije. Laboratorij treba svoje etalone kalibrisati u akreditovanim ili ovlaštenim laboratorijama ili u državnim mjeriteljskim ustanovama te ispuniti sljedeće zahtjeve:

- posjedovati svu neophodnu opremu uz garanciju sljedivosti,
- imati na raspolaganju neophodne standarde i procedure kalibracije,
- biti u mogućnosti da obezbijedi ambijentne uvjete prema zahtjevima standarda za kalibraciju,
- imati definisane procedure za proračun mjerne nesigurnosti,
- imati obučeno i osposobljeno osoblje.

Na koji, od navedenih načina, će se osigurati sljedivost za svaku konkretnu mjernu veličinu zavisi od potreba i mogućnosti svake države. Svaka država će napraviti svoj sistem za osiguranje sljedivosti za svaku konkretnu veličinu, odnosno definisati piramidu sljedivosti, koja daje jasan prikaz hijerarhije etalona i sistem za utvrđivanje sljedivosti. Na slici I-4 prikazana je piramida sljedivosti sa osnovnim karakteristikama svakog pojedinog stepena piramide [7].

Etaloni (ispitna oprema)	Odgovornost	Svrha	Osnova za kalibraciju ili mjerenje	Dokumentacija za kalibraciju
	Nacionalni metrološki institut	Održavanje i prenošenje nacionalnih etalona	Statutarna obaveza za prezentovanje SI jedinica i osiguranje internacionalnog poređenja	Certifikat o kalibraciji za referentni etalon
	Akreditovani kalibracioni laboratoriji	Čuvanje metrološke infrastrukture države	Certifikat o kalibraciji od nacionalnog metrološkog instituta ili akreditovane laboratorije	Certifikat o kalibraciji za radni etalon ili tvornički etalon
	Kalibracioni laboratoriji u kompaniji (in-house calibration)	Nadzor nad ispitnom opremom za vlastite potrebe	Certifikat o kalibraciji od nacionalnog metrološkog instituta ili akreditovane laboratorije	Tvornički certifikat o kalibraciji, kalibraciona markica
	Sve sekcije kompanije	Mjerenja i ispitivanja kao dio mjera osiguranja kvaliteta	Tvornički certifikat o kalibraciji, kalibraciona markica i slično	Ispitni znak ili slično

Slika I-4. Piramida sljedivosti [7]

Etalon je mjera, mjerilo ili mjerni sistem namijenjen određivanju, pohranjivanju i reprodukciji neke mjerne jedinice radi prenošenja njene vrijednosti na druga mjerila da bi mogla poslužiti kao referentna vrijednost [8].

Često se za isti etalon mogu primijeniti dva različita izraza zavisno sa kojeg stanovišta posmatramo taj etalon. Ovisno o mjeriteljskom kvalitetu etalona i području korištenja razlikuju se [9]:

- Primarni mjerni etalon - primarni etalon je etalon najvišeg mjeriteljskog nivoa u određenom području čije se vrijednosti prihvataju bez pozivanja na druge etalone istog kvaliteta. On se nikada ne koristi za direktnu kalibraciju nego se samo upoređuje sa rezervnim etalom ili referentnim materijalom. Prvi etalon u kalibracijskoj hijerarhiji je uvijek primarni.
- Međunarodni mjerni etalon ili međunarodni etalon je etalon prihvaćen međunarodnim sporazumom da bude međunarodna osnova za utvrđivanje vrijednosti svih ostalih etalona neke karakteristične veličine.
- Nacionalni mjerni etalon ili nacionalni etalon je etalon prihvaćen da u državi bude osnova za utvrđivanje vrijednosti svih ostalih etalona za neku karakterističnu veličinu. Nacionalni etalon je također primarni.
- Referentni mjerni etalon ili referentni etalon je etalon najvišeg mjeriteljskog nivoa za određeno područje od kojeg se izvode sva mjerenja na tom području. Referentni etalon se koristi za kalibraciju radnih etalona.

- Radni mjerni etalon ili radni etalon je etalon koji se kalibriše sa referentnim etalom, obično služi za kalibraciju mjerila ili referentnih materijala. Radni etalon može istovremeno biti referentni ako se direktno kalibriše državnim etalom.
- Prenosni mjerni etalon je etalon namijenjen za prenos sa jednog mjesta na drugo.

Prema SI sistemu jedinica, kako je već navedeno, mjerna jedinica za silu je Newton (N). To je izvedena SI jedinica što znači da nema međunarodno dogovorene vrijednosti za etalon kao npr. 1 kilogram ili 1 metar. Nema međunarodnog primarnog etalona za silu, nego sljedivost opreme za mjerenje sile počinje od primarnog etalona za određenu državu ili određeno mjeriteljsko područje. To su etaloni najvišeg kvaliteta u jednoj državi i predstavljaju nacionalne etalone za silu. Nacionalni etalon za silu je uređaj sa tegovima preko kojih se sila ostvaruje direktno, bez poluga, hidrauličnog sistema i slično. Kalibracija tega ostvaruje se poređenjem sa referentnim tegovima uz osiguranje sljedivosti do nacionalnog etalona mase. Tegovi trebaju biti izrađeni od valjanog ili lijevanog metala a vanjske površine trebaju imati obradu tipa najmanje 125 u skladu sa specifikacijom ANSI B46.1. Mase tegova se trebaju utvrditi unutar 0,005 % njihovih vrijednosti poređenjem do primarnog etalona za masu. Primarni etalon mase se čuva u Francuskoj i drugi etaloni mase nižeg ranga se upoređuju sa ovim etalom uz nesigurnost reda veličine 10^{-9} . Takođe i gravitacija (g) je izvedena veličina (m/s^2) i njena nesigurnost se može izmjeriti sa nesigurnošću od 10^{-6} . Shodno tome, nepoznata sila se može uporediti sa silom gravitacije sa nesigurnošću reda veličine od 10^{-6} . Sila koju teg određene mase ostvaruje na zraku računa se prema jednačini [10].

$$F = \frac{M \cdot g}{9,80665} \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\right)$$

gdje je:

F – sila, N

M – masa tega, kg

g – lokalna akceleracija zbog gravitacije, m/s^2

d – gustoća zraka, kg/m^3

D – gustoća tega, kg/m^3



Primarni nacionalni etalon sile smješten je u PTB-Physikalisch Technische Bundesanstalt laboratoriju, koji posjeduje DAkkS akreditaciju. Nacionalni etalon sile od 1 MN sa osnovnim karakteristikama prikazan je na slici I-5. [11].

Mjerno područje	1 MN
Tip	1-MN-K-NME
Proširena mjerna nesigurnost ($k=2$)	$2 \cdot 10^{-5}$
Mehanizam opterećenja	Direktno tegovima

Slika I-5. Primarni nacionalni etalon sile od 1MN

Referentni etaloni su statični etaloni za mjerenje sile i u piramidi sljedivosti su na nivou ispod nacionalnih, imaju najviši mjeriteljski kvalitet na nekom području te osiguravaju sljedivost ostalih etalona sile do nacionalnog etalona. Smješteni su u akreditovanim kalibracionim laboratorijama. Obzirom na mehanizme realizacije sile osiguravaju različite vrijednosti

kalibracione mjerne mogućnosti. Mogući mehanizmi realizacije sile i pripadajuće tipične nesigurnosti date su u tabeli I-2. [12, 13].

Tabela I-2. Referentni etaloni prema mehanizmu opterećenja i odgovarajuće kalibracione mjerne mogućnosti

Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećenja	Kalibraciona mjerna mogućnost (izražena kao proširena mjerna nesigurnost)
Mehanizam opterećenja direktno tegovima	5×10^{-5} do 1×10^{-4}
Hidraulični mehanizam opterećenja	1×10^{-4} do 5×10^{-4}
Polužni mehanizam opterećenja	1×10^{-4} do 5×10^{-4}
Komparatorni sistem	do 5×10^{-3}

Referentni etaloni sa različitim mjernim područjem sile prikazani su na slici I-6.



Slika I-6. Referentni etaloni sile sa direktnim opterećenjem tegovima [11, 14]
a) od 100 kN



b) od 25 kN

Prenosni etaloni za silu koriste se za kalibraciju drugih etalona za silu ili za kalibraciju uređaja za mjerenje sile (kidalice, prese, dinamometri). Prenosni etaloni sile su na nižem mjeriteljskom nivou od referentnih etalona a kalibrišu se referentnim ili rjeđe nacionalnim etalom sile.

Prenosni etaloni uglavnom pripadaju mjerilima sile sa elastičnim elementima. Sastoje se od:

- mjerne ćelije odnosno deformacijskog tijela,
- mjernog pojačala signala,
- uređaja za očitavanje izlaznog signala,
- kabla sa kojim se ostvaruje fizička veza između mjerne ćelije i pojačala signala.

U nekim slučajevima neki od navedenih elemenata su u jednoj konstrukcijskoj cjelini, najčešće uređaj za očitavanje izlaznog signala i mjerno pojačalo signala.

Pretvarač veličine deformacije je dio koji određenu deformaciju deformacijskog tijela pretvara u veličinu pogodnu za mjerenje.

Uređaj za očitavanje izlaznog signala služi za pokazivanje rezultata mjerenja i može biti analogni ili digitalni.

Mjerne ćelije trebaju biti dovoljno otporne na vanjske uticaje i konstruisane tako da njihova mjerna nesigurnost ne bude ugrožena kod rukovanja, transporta i normalnog korištenja.

U cilju kalibracije prenosnih etalona u referentnoj mašini i njihove jednostavne aksijalne instalacije u ispitnu mašinu, u toku kalibracije ispitnih mašina, značajne su specifične dimenzije mjernih ćelija i njihovih odgovarajućih adaptera koje su definisane normom BAS EN ISO 376:2005.

Adapteri trebaju biti dizajnirani na takav način da se obezbijedi aksijalna primjena sile. U pravilu, mjerne ćelije, koje se koriste u području zatezanja, trebaju biti montirane sa dvije cilindrične navrtke, dva nosača i ako je potrebno sa dva posredna prstena, dok mjerne ćelije, koje se koriste u području pritiska, trebaju biti montirane sa jednom ili dvije kompresione podloge. Materijal koji se koristi za izradu adaptera treba imati napon tečenja najmanje 350 N/mm^2 [19].

Podloge za prenos sile se koriste kao komponente prenosnog etalona kod kalibracije u području pritiska. Ako podloge imaju dvije ravne površine za prenos sile trebaju biti planparalelne. Kod kalibracije prenosnih etalona u referentnim mašinama, pritisak na pritisnu površinu ne smije biti veći od 100 N/mm^2 , a ako je potrebno, trebaju biti izabrane dodatne podloge odgovarajućeg oblika i dimenzija i pozicionirane na način da se obezbijedi potpuno nalijezanje mjerne ćelije i aksijalnost mjerne ćelije u referentnoj mašini. Visine i promjeri podloga trebaju biti prilagođene mjernoj ćeliji na način da podloge budu centrirane i bez bočnog kontakta sa mjernom ćelijom. Promjer podloga treba biti $0,1 \text{ mm}$ do $0,2 \text{ mm}$ veći od promjera mjerne ćelije.

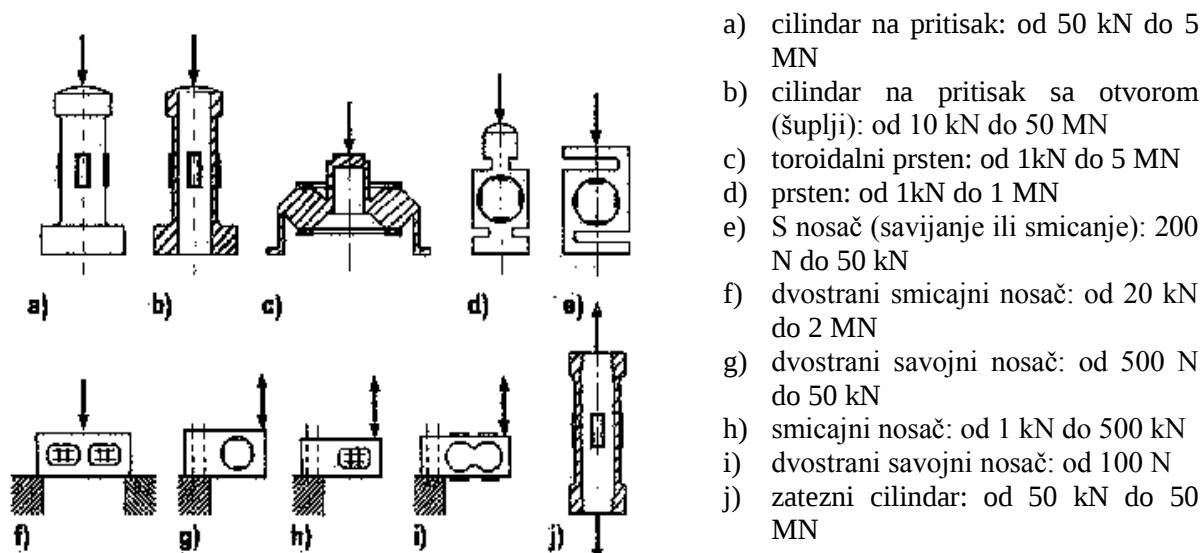
Mjerna ćelije, odnosno deformacijska tijela prema smjeru opterećenja mogu biti:

- za zatezne sile,
- za pritisne sile,
- za zatezne i pritisne sile.

Prema vrsti deformacije mjerne ćelije se dijele na:

- mjerne ćelije sa deformacijom koja se ogleda u promjeni dužine,
- mjerne ćelije sa deformacijom koja se ogleda u promjeni volumena,
- mjerne ćelije sa deformacijom koja se ogleda u električnim ili magnetnim promjenama.

Mjerne ćelije uglavnom pripadaju mjerilima sile sa elastičnim elementima. Oblik elastičnog elementa zavisi od mjernog područja sile i limitiranih dimenzija. Na slici I-7 dati su različiti elastični elementi i njihova tipična mjerna područja. Svaki elastični element je izveden za mjerenje sile u pravcu uzdužne ose bez djelovanja bilo koje druge sile.



Slika I-7. Tipovi elastičnih elemenata i njihova uobičajena dopuštena opterećenja [1]

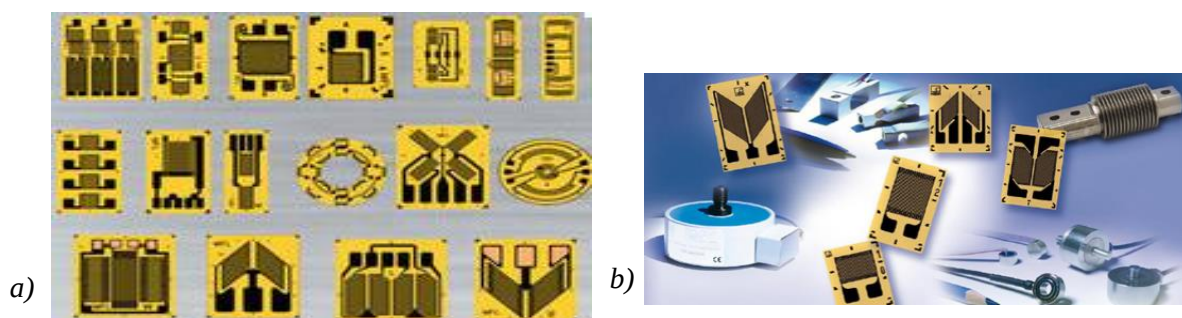
Materijali koji se koriste za izradu elastičnih elemenata su obično alatni čelici, nerđajući čelici, aluminijum ili berilijum i bakar i trebaju osigurati linearan odnos između napona, odnosno primjenjene sile i deformacije, odnosno izlazne veličine sa malom histerezom u radnom području. Ovi elementi osiguravaju visok nivo ponovljivosti između ciklusa primjenjenih sila.

Za postizanje ovakvih karakteristika i maksimalne stabilnosti materijal se podvrgava specijalnim termičkim tretmanima. Prenosni etaloni sile mogu pripadati mjerilima sile sa elektrootpornim mjernim trakama. Princip rada ovih traka zasniva se na povećanju dužine sa odgovarajućim smanjenjem promjera i promjenom u električnom otporu, naravno u području elastičnosti. Materijali koji se koriste za proizvodnju traka su bakar-nikl, nikl-krom, nikl-krom-molibden i platina-volfram legure. Postoje različite elektrootporne mjerne trake dostupne za različitu primjenu [1].

Najčešće korišteni tipovi mjernih traka su:

- linearne trake,
- T – rozete,
- dvostruke smičuće trake.

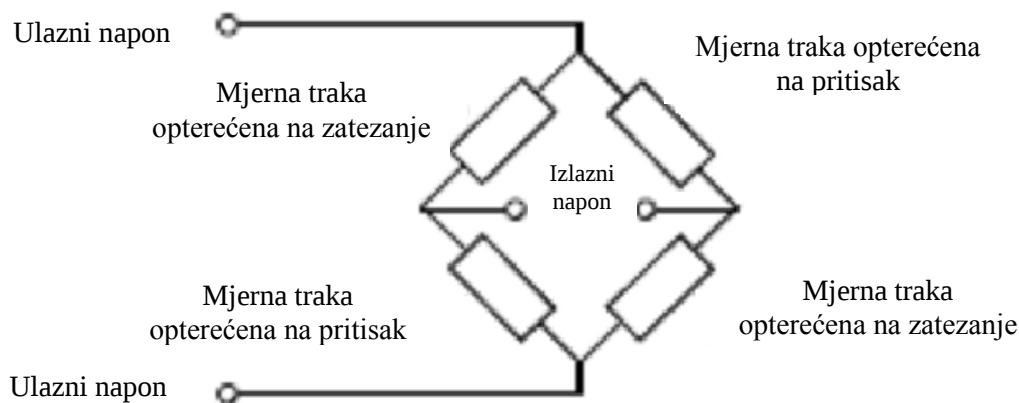
Neki primjeri mjernih traka prikazani su na slici I-8.



Slika I- 8. Tipovi mjernih traka [15, 16]

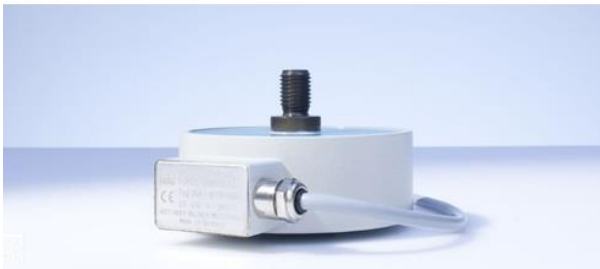
a) Linearne trake, T-rozete, dvostruke smičuće trake b) Mjerne trake proizvođača HBM

Elektrootporne mjerne trake su zavojnice ili metalne folije. One se povezuju u Wheatstonov most, slika I-9. Kada sila djeluje na mjerilo sile, odnosno na deformacijsko tijelo mjerila sile, zajedno sa deformacijom tijela deformisat će se i mjerne trake što će rezultirati promjenom u električnom otporu. Svaka promjena otpora rezultira promjenom napona u mostu kojeg je lakše očitavati i bilježiti i iskazuje se u jedinici mV/V .



Slika I-9. Položaj mjernih traka u Wheatstonovom mostu [1]

Budući da je promjena otpora proporcionalna promjeni sile, a promjena napona proporcionalna promjeni otpora slijedi da je promjena napona proporcionalna promjeni sile. Na slici 1-10 prikazani su neki tipovi mjerila sile sa mjernim trakama, odnosno mjerne ćelije za silu.

	Pretvarač sile (mjerna ćelija) tipa U2B, pogodan za mjerenje sile u području zatezanja i pritiska od 0,5 kN do 200 kN: - Mjeri statičku i dinamičku silu sa visokom tačnošću, - Proizveden od nehrđajućeg čelika i pogodan za rad u teškim radnim uvjetima.
	Pretvarač sile (mjerna ćelija) tipa U5, pogodan za mjerenje sile u području zatezanja i pritiska od 100 kN do 500 kN: - Izuzetan kvalitet mjerenja i brzo i lako montiranje.
	Pretvarač sile (mjerna ćelija) tipa C2, pogodan za mjerenje sile u području pritiska od 0,5 kN do 200 kN: - Osigurava izuzetnu tačnost mjerenja statičke i dinamičke sile.
	Referentni pretvarač sile (mjerna ćelija): - Klasa 00 prema ISO 376, - Namijenjen za mjerenje sila u području pritiska do 3 MN, - Sastavljen od tri C18/1MN koje se mogu koristiti i pojedinačno.
	Visokoprecizni referentni pretvarač sile (mjerna ćelija) u mjernom području od 20 kN do 100 kN klase 00 i mjernom području do 500 kN klase 05 prema ISO 376: - Dugotrajna stabilnost, - Mjerenje sile u području zatezanja i pritiska.

Slika I-10. Mjerne ćelije za silu sa mjernim trakama [16]

Ispitne mašine za mjerenje sile su posljednje u piramidi sljedivosti. To su najčešće Kidalice koje služe za ispitivanje materijala zatezanjem i kalibrišu se prenosnim etalonima za silu prema standardu BAS EN ISO 7500-1:2004 koji su prethodno kalibrisani referentnim etalom prema standardu BAS EN ISO 376:2005.

Kidalice se razlikuju prema [17]:

- načinu opterećenja, odnosno nanošenja sile,
- načinu očitavanja vrijednosti sile (analogna ili digitalna skala),
- namjeni i slično.

U posljednjoj deceniji kidalice su usavršene u pogledu tačnosti pokazivanja, mogućnosti regulisanja brzine nanošenja opterećenja, načinu očitavanja sile odnosno napona, načinu mjerenja uzdužnih i poprečnih deformacija. Na slici I-11. prikazana je univerzalna hidraulična mašina za statička ispitivanja - kidalica od 200 kN osavremena modulom ZWICK i software-om testXpert vlasništvo Univerziteta u Zenici OJ Metalurški institut «Kemal Kapetanović».



Slika I-11. Univerzalna hidraulična mašina za statička ispitivanja – kidalica od 200 kN

Prema položaju ose epruvete kidalice mogu biti [17]:

- horizontalne,
- vertikalne.

Najčešće su zastupljene vertikalne kidalice sa mjernim područjem do 1000 kN i takve konstrukcije da su to univerzalne mašine na kojima se pored ispitivanja zatezanjem mogu provoditi i ispitivanje savijanjem, smicanjem i pritiskom.

2. KALIBRACIJA PRENOSNIH ETALONA SILE

Kalibracija je skup aktivnosti kojima se u određenim uslovima uspostavlja odnos između vrijednosti koje pokazuje mjerni instrument ili mjerni sistem ili vrijednosti koje predstavljaju specijalizovanu mjeru ili referentni materijal i pripadajućih vrijednosti realiziranih sa etalonima [18].

Osnovni cilj kalibracije, a samim tim i mjerne sljedivosti, je osiguranje ujednačenosti mjerenja u kompaniji proizvođača proizvoda i kupca koji taj proizvod ugrađuje, odnosno mora postojati garancija da proizvođač i kupac mjere «istom mjerom».

Sa razvojem i usavršavanjem prenosnih etalona dolazi do promjene u njihovoj preciznosti i mjernoj nesigurnosti što uzrokuje i modifikaciju standarda za kalibraciju prenosnih etalona u smislu pooštavanja kriterija za klasifikaciju prenosnih etalona.

U tabeli I-3 date su vrijednosti kriterija za klasifikaciju prenosnih etalona prema njemačkoj normi DIN, evropskoj EN i međunarodnoj ISO [19, 20, 21].

Tabela I-3. Uporedne vrijednosti kriterija za klasifikaciju prenosnih etalona

Standard	Klasa	Relativne greške, %		F_{min}	Proširena mjerna nesigurnost U , %
		obnovljivosti b	histereze ν		
DIN 51301:1973	G1	$\pm 0,10$	$\pm 0,2$	1000 r	-
	G2	$\pm 0,20$	$\pm 0,3$	500 r	-
	G3	$\pm 0,30$	$\pm 0,4$	333 r	-
DIN 51301: 1986	G0,5	$\pm 0,10$	$\pm 0,02$	2000 r	$\pm 0,15$
	G1	$\pm 0,20$	$\pm 0,04$	1000 r	$\pm 0,25$
	G2	$\pm 0,30$	$\pm 0,10$	500 r	$\pm 0,30$
	G3	$\pm 0,30$	$\pm 0,10$	500 r	$\pm 0,30$
EN 10002-3: 1994	00	$\pm 0,05$	$\pm 0,07$	4000 r	$\pm 0,01$
	05	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$	2000 r	$\pm 0,02$
	1	$\pm 0,20$	$\pm 0,30$	1000 r	$\pm 0,05$
	2	$\pm 0,40$	$\pm 0,50$	500 r	$\pm 0,10$
ISO 376: 2004	00	$\pm 0,05$	$\pm 0,07$	4000 r	$\pm 0,01$
	05	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$	2000 r	$\pm 0,02$
	1	$\pm 0,20$	$\pm 0,30$	1000 r	$\pm 0,05$
	2	$\pm 0,40$	$\pm 0,50$	500 r	$\pm 0,10$

U tabeli I-3. dat je primjer razlika samo za klasifikaciju po kriteriju relativne greške obnovljivosti b , relativne greške histereze ν , najmanje sile za klasifikaciju F_{min} i proširene mjerne nesigurnosti U . Iz tabele se vidi da su vrijednosti kriterija pooštrene u standardu DIN 51301 iz 1986. u odnosu na standard iz 1973. godine. Takođe, standardi su različiti prema broju kriterija za klasifikaciju i prema načinu njihovog izračunavanja. Ostali kriteriji za klasifikaciju, koji nisu navedeni u tabeli, ne mogu se upoređivati jer su različiti i po značenju i po izračunavanju. Kriteriji koje propisuje standard ASTM E 74 nisu uporedivi sa DIN, EN i ISO normom i iz tog razloga nisu ni navedeni u tabeli.

Analiza standarda za klasifikaciju prenosnih etalona pokazuje da postoje značajne razlike i u minimalnom broja kalibracionih tačaka u mjernoj seriji, definisanim položajem mjerne ćelije u referentnoj mašini kod kalibracije u mjernim serijama, broju mjernih serija, vremenu čekanja za očitavanje vrijednosti izlaznog signala i po drugim zahtjevima definisanim u procedurama kalibracije.

U cilju postizanja saglasnosti i jedinstva kod kalibracije prenosnih etalona na području Evrope prihvaćena je međunarodna norma ISO 376 i proglašena nevažećom evropska norma EN 10002-3, koja je definisala iste vrijednosti kriterija za klasifikaciju etalona kao i međunarodna ISO norma ali se prema nekim zahtjevima procedure kalibracije razlikovala od ISO norme.

2.1 Procedura kalibracije prenosnih etalona prema standarda BAS EN ISO 376:2005

Standard BAS EN ISO 376:2005 je međunarodna norma koja propisuje zahtjeve za kalibraciju prenosnih etalona sile, koji se koriste za statičku verifikaciju jednoaksijalnih ispitnih mašina, tj. ispitnih mašina na zatezanje i/ili pritisak i opisuje proceduru za klasifikaciju prenosnih etalona.

Svi dijelovi prenosnog etalona trebaju biti pojedinačno i jedinstveno identifikovani sa nazivom i proizvođačem, tipom i serijskim brojem. Za mjernu ćeliju treba biti navedeno maksimalno mjereno područje.

Prije kalibracije prenosnog etalona potrebno je provjeriti da li se etalon uopšte može kalibrisati. To se provjerava preliminarnim testovima preopterećenja. Test preopterećenja se sastoji u tome da se etalon četiri puta redom preopteretiti do sile veće od nominalne najmanje 8% a najviše 12% u vremenu od 60 do 90 sekundi.

Prenosni etaloni mogu imati analogni ili digitalni sistem za očitavanje izlaznog signala. Kod analognog pokazivanja izlaznog signala, udaljenosti susjednih oznaka na skali trebaju biti jednake. Rezolucija r se dobija kao odnos između širine kazaljke (pointera) i rastojanja između centara susjednih, međusobno najbližih, gradacija skale (interval skale). Preporučeni odnosi su $1/2$, $1/5$ ili $1/10$, pri čemu se zahtijeva rastojanje od $1,25\text{ mm}$ ili veće da bi se usvojila podjela skale od jedne desetine. Za rezoluciju digitalne skale se smatra prirast zadnjeg aktivnog broja na numeričkom indikatoru.

Minimalna primijenjena sila na etalonu mora zadovoljiti dva slijedeća uslova:

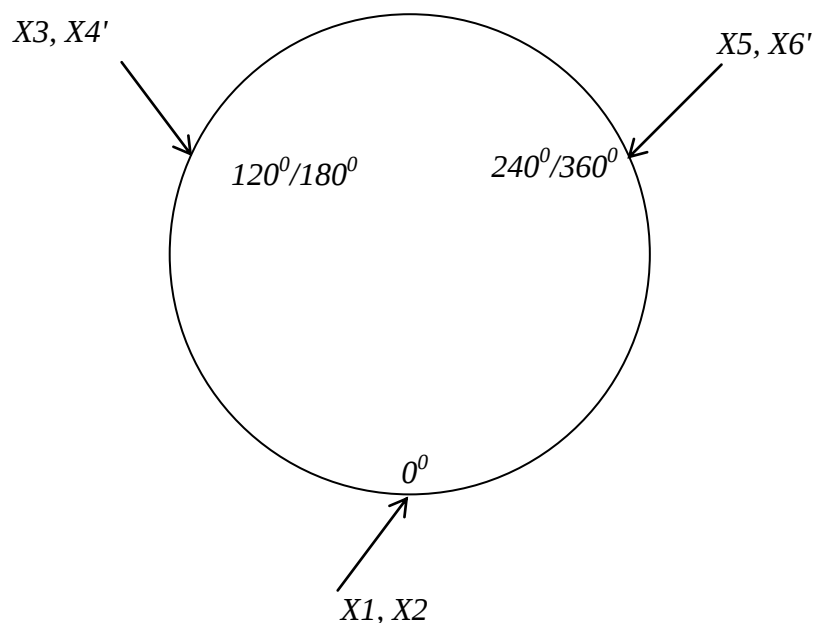
a) minimalna sila treba biti jednaka ili veća od:

- $4000 \times r$ za klasu 00,
- $2000 \times r$ za klasu 0,5,
- $1000 \times r$ za klasu 1,
- $500 \times r$ za klasu 2.

b) minimalna sila treba biti veća ili jednaka od $0,02 F_f$ – maksimalni kapacitet prenosnog etalona

Prije nego se mjerna ćelija opteretiti silama za kalibraciju u zadanom smjeru (pritisak, zatezanje) potrebno ju je predopteretiti. Na mjernu ćeliju se tri puta djeluje maksimalnom silom koja se zadržava od 1 do 1,5 minute. Predopterećenja moraju biti u istom smjeru i moraju djelovati u istom položaju kao i opterećenja. U toku predopterećenja zapisuju se izlazni signali kod maksimalne sile i zaostatak nakon rasterećenja. Prije svake promjene smjera opterećenja u toku kalibracije, potrebno je predopteretiti etalon u novom smjeru.

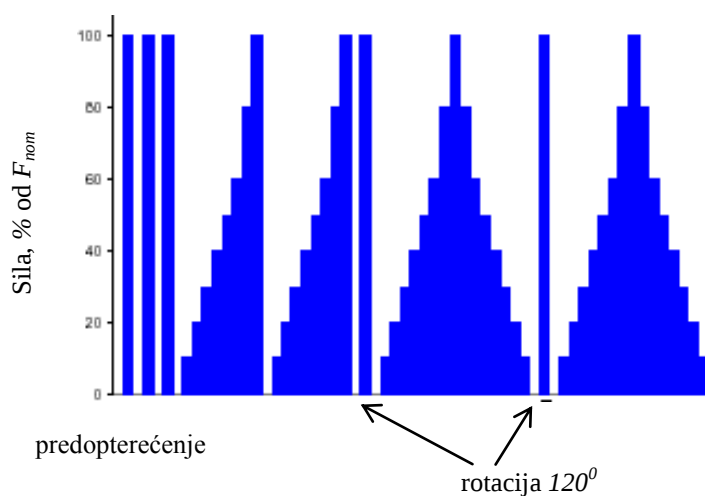
Kalibracija se vrši primjenom dvije serije kalibracionih sila na mjernu ćeliju samo sa povećanjem vrijednosti sila bez pomjeranja mjerne ćelije. Zatim se primjenjuju dvije serije kalibracionih sila sa povećanjem i dvije serije sa smanjenjem sile. Između ove dvije serije sila mjerna ćelija se rotira oko svoje ose za 120° , odnosno 180° , u odnosu na prvobitni položaj. Silama za kalibraciju etalon se opterećuje u 6 mjernih serija. Prve dvije mjerne serije sila ($X1$ i $X2$) su serije rastućih iznosa sila bez promjene položaja etalona (položaj 0°). Treća serija ($X3$) je rastuća a četvrta ($X4'$) opadajuća i određuju se za položaj etalona zarotiran za 120° , odnosno 180° . Nakon toga, etalon se zarotira na položaj od 240° , odnosno 360° u odnosu na početni, te se etalon opterećuje petom serijom ($X5$) rastućih sila i šestom serijom ($X6'$) opadajućih sila, slika I-12.



Slika I-12. Pozicije etalona kod kalibracije [21]

Grafički prikaz procedure kalibracije etalona dat je na slici I-13.

Za određivanje kalibracione krive, broj kalibracionih tačaka ne smije biti manji od osam i one



trebaju biti, koliko je moguće, jednako raspoređene po cijelom mjernom području. U svakom mjernom smjeru bilježi se nula signal, odnosno prate se očitavanja kada sila ne djeluje i to prije početka djelovanja sile i najmanje 30 sekundi nakon rasterećenja. Između susjednih serija mjerenja treba sačekati najmanje tri minute.

Slika I-13. Grafički prikaz procedure kalibracije [22]

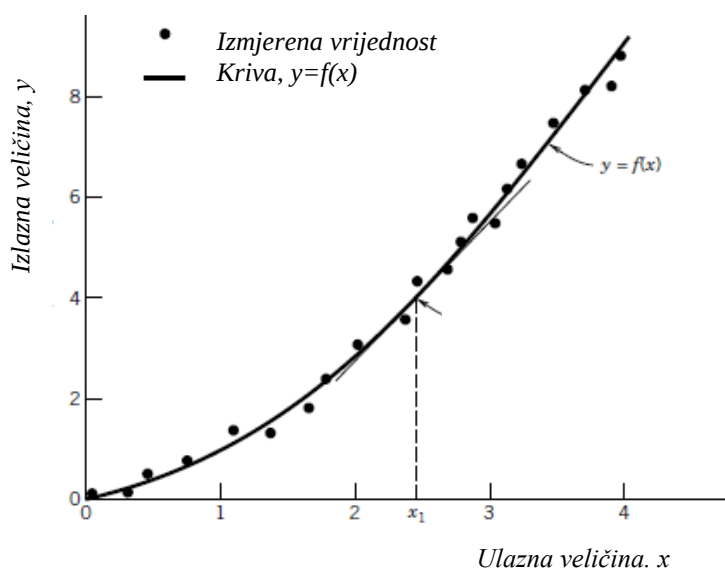
Značajnija promjena nula očitavanja može ukazati na plastičnu deformaciju usljed preopterećenja mjerne ćelije.

Vremenski intervali između mjernih (kalibracionih) tačaka trebaju biti što je moguće više ujednačeni a očitavanja bi se trebala raditi nakon najmanje 30 sekundi od početka djelovanja opterećenja.

Kalibracija se realizuje na temperaturi od $+18^{\circ}\text{C}$ do $+28^{\circ}\text{C}$ (sobna temperatura) i treba biti stabilna sa promjenom najviše $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Temperatura kalibracije se obavezno zapisuje u izvještaj/certifikat o kalibraciji.

Prenosni etaloni sile sa mjernim trakama trebaju najmanje 30 minuta za temperaturnu stabilizaciju prije početka kalibracije.

Postupak kalibracije je primjena poznatih ulaznih veličina x_i u zahtjevanom mjernom području, od minimalne do maksimalne vrijednosti, u rastućem ili opadajućem nizu, odnosno povećanje ili smanjenje vrijednosti poznate ulazne veličine u propisanim koracima i zapisivanje izlazne veličine y_i . Raspon mjernog područja i korak prirasta ulazne veličine definisan je metodom



kalibracije. Primjenom poznate ulazne veličine u zahtjevanim koracima i posmatranjem izlazne veličine mjernog sistema može se napraviti kriva kalibracije za mjerni sistem. U toku kalibracije, vrijednost ulazne veličine je kontrolisana nezavisna varijabla dok vrijednost izlazne mjerene veličine postaje zavisna varijabla. Ako se vrijednosti nezavisne kontrolisane varijable i zavisne mjerene varijable nanesu u koordinatni sistem x-y dobit će se kriva kalibracije, slika I-14. Kriva kalibracije ima oblik $y=f(x)$ [23].

Slika I-14. Kriva kalibracije

Kriva ne pokazuje linearno ponašanje i ono se ne može postići u praksi. Relacija između linearnog ponašanja i izmjerenih vrijednosti, mjera je nelinearnog ponašanja realnog sistema. Ova nelinearnost će biti uzeta u obzir kod određivanja kriterija za klasifikaciju prenosnog etalona.

2.2 Kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona

Kalibracija prenosnog etalona je statičko mjerenje, što znači da vrijeme nije faktor u varijabli koja se mjeri. Postupak kalibracije prenosnog etalona, kao kriterij za klasifikaciju, ne uzima u obzir varijable koje vremenom relativno sporo variraju, ni dugoročnu stabilnost prenosnog etalona.

Kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona koji je kalibrisan u skladu sa normom BAS EN ISO 376:2005 su:

1. Relativne greške prenosnog etalona koje se računaju iz rezultata kalibracije:
 - Relativna greška ponovljivosti bez rotacije b' ,
 - Relativna greška obnovljivosti sa rotacijom b ,
 - Relativna greška interpolacije f_c ,
 - Relativna greška nule f_0 ,
 - Relativna greška histereze ili reverzibilnosti v .
2. Nesigurnost primjenjene kalibracione sile, odnosno kalibraciona mjerna mogućnost referentnog etalona

2.2.1 Relativne greške prenosnog etalona koje se računaju iz rezultata kalibracije

Relativna greška ponovljivosti bez rotacije b'

Pod ponovljivim uslovima podrazumijevaju se uslovi koji uključuju istu mjernu proceduru, istog operatora, isti mjerni sistem, iste radne uslove, istu lokaciju i ponavljanje mjerenja u vrlo kratkom vremenskom intervalu. Sposobnost mjernog sistema da da istu izlaznu vrijednost pri ponovljenoj primjeni iste vrijednosti ulazne veličine definiše se kao ponovljivost [9].

Nemogućnost tačnog ponavljanja se uglavnom ogleda u nedosljednosti mjerenja koje se najlakše identifikuje ponavljanjem mjerenja. Greška ponovljivosti se računa iz vrijednosti izlaznog signala X_1 i X_2 , za svaku kalibracionu tačku, na bazi mjernih serija kod pozicije 0^0 mjerne ćelije prema jednačini:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\overline{X}_{wr}} \right| \cdot 100 \dots\dots\dots(2-1)$$

$$\overline{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} \dots\dots\dots(2-2)$$

Relativna greška obnovljivosti sa rotacijom b

Pod obnovljenim uslovima mjerenja podrazumijevaju se uslovi koji uključuju promjenu jedne ili više karakterističnih uslova ponovljivosti. Kod kalibracije prenosnog etalona sile, pod obnovljivošću mjerenja podrazumijeva se promjena položaja mjerne ćelije u referentnoj mašini. Relativna greška obnovljivosti se računa iz maksimalne X_{max} i minimalne X_{min} vrijednosti izlaznog signala, za svaku kalibracionu tačku, na osnovu rezultata mjernih serija sa povećanjem vrijednosti sile prema jednačini:

$$b = \left| \frac{X_{max} - X_{min}}{\overline{X}_r} \right| \cdot 100 \dots\dots\dots(2-3)$$

$$\overline{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \dots\dots\dots(2-4)$$

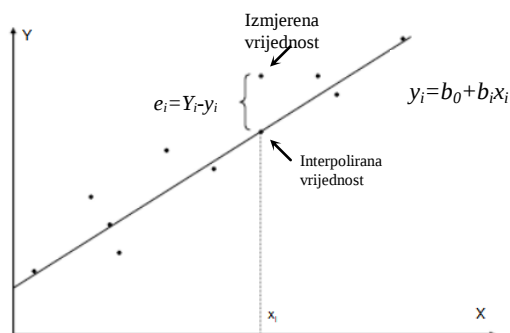
Relativna greška interpolacije f_c

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 krive pri čemu kriva neće prolaziti kroz sve tačke. Metodom najmanjih kvadrata traže se parametri proizvoljne krive, tako da je pretpostavljena funkcija najbolje opisana zadanim tačkama, slika I-15. Kriterij kod određivanja parametara je da suma kvadrata, izmjerenih vertikalnih odstupnja od krive, bude minimalna [24].

$$e_i = Y_i - y_i$$

gdje Y_i predstavljaju izmjerene vrijednosti a y_i vrijednosti tražene funkcije za određeni x_i .

*Označene su samo jednačine koje se pojavljuju kod eksperimentalnog dijela rada



Uslov minimalnih kvadrata je:

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

Slika I-15. Rasipanje rezultata mjerenja

Ako niz tačaka ne pokazuje pravolinijsku tendenciju bira se polinom drugog reda, odnosno parabola 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 najmanji moguć. Postavlja se pitanje kojeg stepena je potreban polinom za aproksimaciju. Naravno da će se povećanjem stepena polinoma smanjivati odstupanje. Redom se povećava stepen polinoma sve dok postoji znatno smanjenje odstupanja.

Greška interpolacije se određuje za polinom karakterističnog stepena, koji određuje zavisnost izlaznih podataka o sili a dobiven je iz rezultata mjerenja. Iz ove vrijednosti se može procijeniti koliko dobro tačke interpolirane polinomom aproksimiraju stvarne rezultate kalibracije.

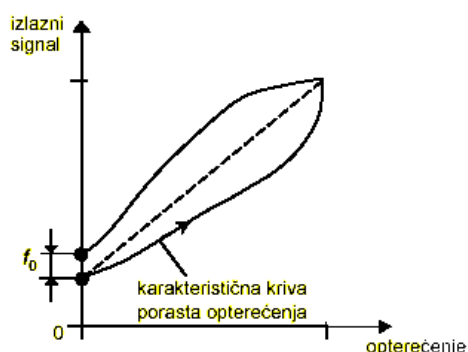
Relativna greška interpolacije se računa prema jednačini:

$$f_c = \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \cdot 100 \dots\dots\dots (2-5)$$

Korišteni polinom se navodi u certifikatu o kalibraciji.

Relativna greška nule f_0

Greška nula se dobija iz očitavanja nula vrijednosti prije i poslije svake mjerne serije i to 30 sekundi nakon potpunog rasterećenja, slika I-16.



Relativna greška nule se računa iz jednačine:

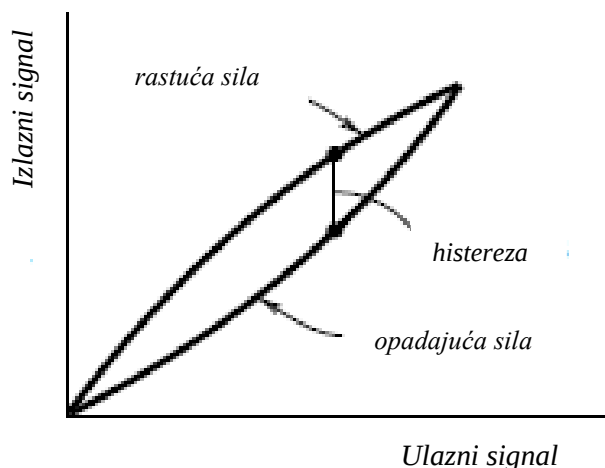
$$f_o = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100 \dots\dots\dots (2-6)$$

Slika I-16. Relativna greška nule [22]

Kod klasifikacije prenosnog etalona u obzir se uzima najveće dobiveno odstupanje nula vrijednosti.

Relativna greška histereze ili reverzibilnosti v

Greška histereze se odnosi na razliku između očitanih vrijednosti signala u smjeru opterećenja i u smjeru rasterećenja za svaku kalibracionu tačku, slika I-17. [23].



Relativna greška histereze se računa za susjedne mjerne serije kod kojih je jedna rastuća a druga opadajuća. Histereza znači da, kod iste ulazne sile, izlazne vrijednosti neće biti jednake u rastućoj i opadajućoj seriji. Relativna greška histereze računa se iz razlike ove dvije serije za pozicije etalona od 120^0 i 240^0 .

Slika I-17. Greška histereze ili reverzibilnosti

Za mjerne serije sa rotacijom od 120^0 je:

$$v_1 = \left| \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \right| \cdot 100 \dots\dots\dots (2-7)$$

Za mjerne serije sa rotacijom od 240^0 je:

$$v_2 = \left| \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \right| \cdot 100 \dots\dots\dots (2-8)$$

Konačna vrijednost pri nekoj sili je aritmetička sredina od v_1 i v_2 :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \dots\dots\dots (2-9)$$

2.2.2 Nesigurnost primijenjene kalibracione sile, odnosno kalibraciona mjerna mogućnost referentnog etalona

Prenosni etalon se kalibriše sa referentnim etalom koji je višeg mjeriteljskog nivoa. Referentni etalon ima procijenjenu kalibracionu mjernu mogućnost, odnosno proširenu mjernu nesigurnost za odgovarajuće mjerno područje u kojoj su sadržani svi doprinosi nesigurnosti do nacionalnog etalona sile. Ovu vrijednost kalibraciona laboratorija procjenjuje na osnovu rezultata kalibracije referentnog etalona uzimajući u obzir i kalibracionu mjernu mogućnost nacionalnog etalona za silu.

2.3 Princip klasifikacije

Područje za koje se etalon klasificira određuje se tako da se u obzir uzima svaka kalibraciona tačka, jedna za drugom, počevši od maksimalne prema minimalnoj. Područje klasifikacije završava se kod zadnje sile za koju su zadovoljeni uslovi klasifikacije.

Etalon sile može biti klasificiran ili za tačno određenu vrijednost sile ili za interpolirane vrijednosti sile. Ako je etalon klasificiran za tačno određenu vrijednost sile, on se može koristiti samo za tu specifičnu vrijednost sile. Ako je etalon sile klasificiran za interpolaciju on može biti korišten za bilo koju silu u području interpolacije.

Područje klasifikacije etalona sile treba pokriti najmanje područje od 50 % do 100 % od nazivne sile prenosnog etalona.

Za etalone sile koji su klasificirani za specificiranu vrijednost sile, kriteriji za klasifikaciju su:

- relativne greške obnovljivosti i ponovljivosti,
- relativna greška nule,
- relativna greška reverzibilnosti ili histereze.

Za etalone sile koji su klasificirani za interpolirane vrijednosti sile, kriteriji za klasifikaciju su:

- relativne greške obnovljivosti i ponovljivosti,
- relativna greška interpolacije,
- relativna greška nule,
- relativna greška reverzibilnosti ili histerze.

Prema vrijednostima ovih kriterija i vrijednosti nesigurnosti primijenjene kalibracione sile, tabela I-4., određuje se kojoj od četiri klase pripada etalon sile. Istovremeno moraju biti zadovoljeni svi kriteriji [21].

Tabela I-4. Kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona sile

Klasa	Relativne greške prenosnog etalona sile %					Nesigurnost primjenjene kalibracione sile, $k=2$ %
	Obnovljivosti b	Ponovljivosti b'	Interpolacije f_c	Nule f_0	Reverzibilnost v	
00	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	$\pm 0,01$
0,5	0,10	0,050	$\pm 0,050$	$\pm 0,025$	0,15	$\pm 0,02$
1	0,20	0,100	$\pm 0,100$	$\pm 0,050$	0,30	$\pm 0,05$
2	0,40	0,200	$\pm 0,200$	$\pm 0,100$	0,50	$\pm 0,10$

3. MJERNA NESIGURNOST

Svrha svakog mjerenja je određivanje vrijednosti mjerene veličine. Mjerenje počinje sa odgovarajućim tačnim opisom mjerene veličine, mjerne metode i mjernog postupka. Mjerni rezultat je samo aproksimacija ili 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 svakom mjerenju postoje nesavršenosti koje dovode do grešaka koje su uglavnom nepoznate i najčešće se dijele na [18]:

- slučajne,
- sistematske,
- grube.

Slučajne greške su rezultat nepredvidivih i slučajnih vremenskih i prostornih promjena uticajnih veličina. Slučajne greške ustvari predstavljaju rezultat mjerenja umanjen za srednju vrijednost beskonačnog broja mjerenja iste mjerene veličine pod istim uslovima. Shodno tome, slučajne greške se ne mogu potpuno kompenzirati ali se mogu smanjiti povećanjem broja ponavljanja mjerenja. Kako se može izvesti samo ograničen broj mjerenja moguće je odrediti samo procjenu slučajne greške.

Sistematske greške predstavljaju razliku srednje vrijednosti koja bi proizišla iz beskonačnog broja mjerenja iste mjerene veličine izvedene pod istim uslovima i «stvarne» vrijednosti mjerene veličine. Prema tome, sistematske greške se mogu smanjiti ako se uticaj tih veličina na rezultat mjerenja dovoljno poznaje tako da se one mogu kvantificirati a kompenziraju se korekcionim faktorom. Ako je sistematska greška rezultat utvrđenog djelovanja uticajne veličine na mjerni rezultat to djelovanje se može količinski iskazati a da bi se poništilo može se

primijeniti faktor ispravke. Pretpostavlja se, da je nakon ispravke, očekivana vrijednost sistematske greške jednaka nuli. U cilju poništavanja sistemskih djelovanja mjerni instrumenti se kalibrišu etalonima ili referentnim materijalima, međutim, nesigurnost pridružena etalonima, odnosno referentnim materijalima mora se uzeti u obzir.

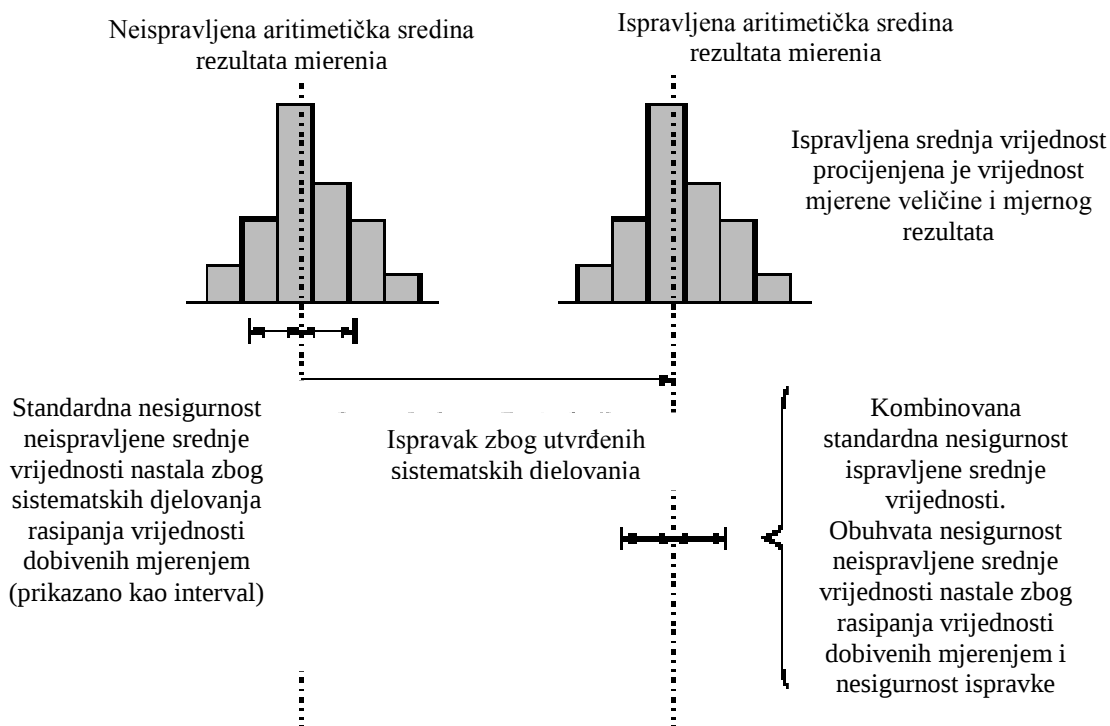
Grube greške uglavnom nastaju kod zapisivanja i analize podataka rezultata mjerenja. Ove greške se mogu eliminisati provjerom podataka i one se ne uzimaju u obzir kod procjene mjerne nesigurnosti.

Rezultat mjerenja i nakon ispravke utvrđenih sistemskih djelovanja zbog nesigurnosti koja potiče od slučajnih djelovanja i zbog nesavršenosti ispravke rezultata nije «stvarna» vrijednost mjerene veličine, slika I-18. Izmjerena vrijednost mjerene veličine i «stvarna» vrijednost mjerene veličine ne mogu se nikada tačno znati, to su još uvijek samo procjene vrijednosti izmjerene, odnosno «stvarne» vrijednosti mjerene veličine. Bez obzira što su tačne vrijednosti doprinosa grešaka mjernog rezultata nepoznate i u potpunosti neodredive mogu se odrediti nesigurnosti pridružene slučajnim i sistemskim djelovanjima koje uzrokuju greške. Čak i ako su procijenjene nesigurnosti male, to nije garancija da je greška rezultata mjerenja mala. Shodno tome, nesigurnost rezultata mjerenja nije uvijek pokazatelj vjerovatnoći da je taj rezultat mjerenja blizu «stvarne» vrijednosti mjerene veličine [26].

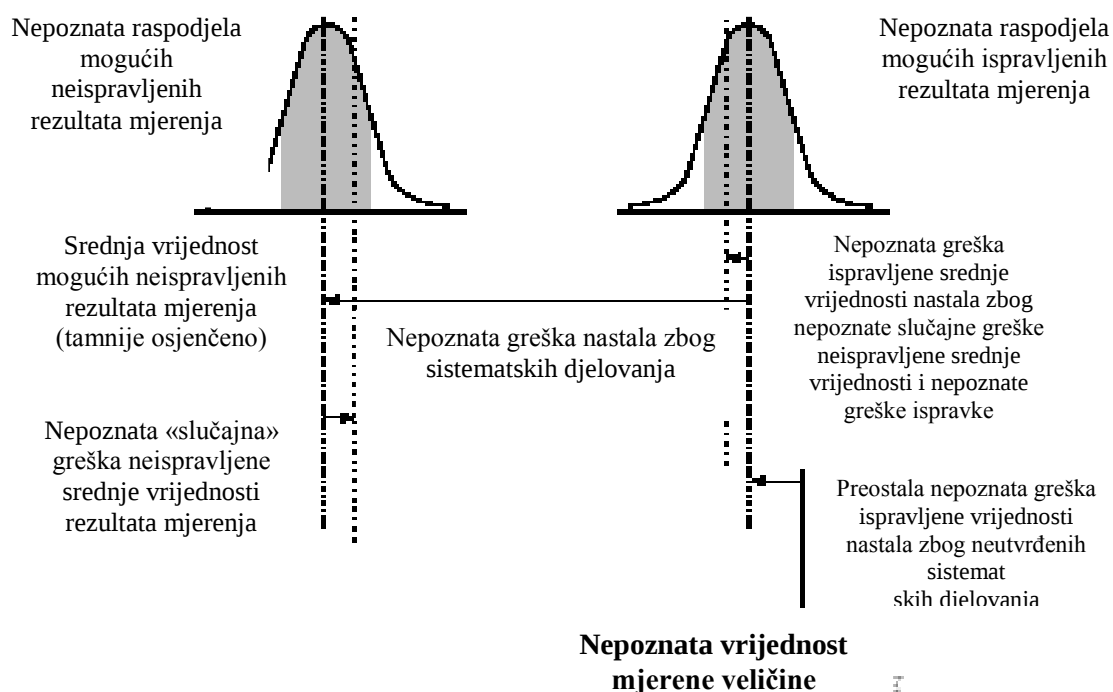
Tačna greška mjernog rezultata općenito je nepoznata i ne može se kvantificirati. Sve što se može uraditi je procijeniti vrijednost ulaznih veličina, uključujući ispravke zbog utvrđenih sistemskih djelovanja zajedno sa njihovim standardnim nesigurnostima, odnosno procijenjenim standardnim odstupanjima, izračunati mjerni rezultat iz procijenjenih vrijednosti ulaznih veličina i kombinovanu standardnu nesigurnost tog rezultata iz standardnih nesigurnosti procijenjenih vrijednosti. Mjerni rezultat je i nakon toga samo pouzdana procjena dobivene vrijednosti mjerene veličine a njegova kombinovana standardna nesigurnost pouzdana mjera njegove moguće greške [27, 28].

Slika I-18. grafički prikazuje pojmove vrijednosti mjerene veličine, greške i nesigurnost [26].

a) *Pojmovi koji se temelje na mjerljivim veličinama*



b) *Pojmovi koji se temelje na neodredivim veličinama*



Slika I-18. Grafički prikaz vrijednosti, greške i nesigurnosti

a) *Pojmovi koji se temelje na mjerljivim veličinama*

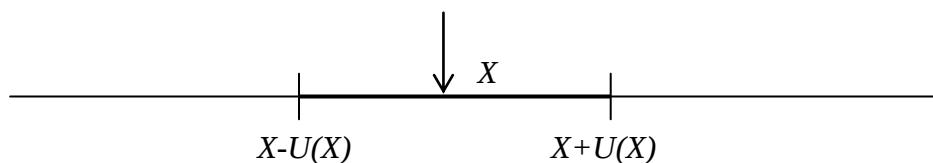
b) *Pojmovi koji se temelje na neodredivim veličinama*

Mjerna nesigurnost se može definisati kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Pod «stvarnom» vrijednošću smatra se vrijednost prema definiciji karakteristične veličine koja bi se dobila savšenim mjerenjem, a po prirodi je neodrediva [9].

Nesigurnost je kvantitativni pokazatelj kvaliteta mjerenja, odnosno pouzdanosti ocjene vrijednosti mjerene veličine, a ukazuje na postojanje sumnje da pomenuta ocjena, koja može biti dobivena i pod skoro idealnim uslovima mjerenja i korigovana na sve poznate izvore greške, može biti «stvarna» vrijednost mjerene veličine. Kako «stvarna» vrijednost bilo koje veličine, izuzev etalona za masu («kilogram» koji se čuva u Parizu) i dogovorene vrijednosti za brzinu svjetlosti, nije poznata niti može biti određena, jasno je da uvijek postoji nesigurnost vrijednosti dobivene kao rezultat bilo kakvog procesa mjerenja [29].

Izraz mjerna nesigurnost usko je povezana sa tačnošću mjerenja. Dok je nesigurnost kvantitativni parametar mjerenja, tačnost mjerenja se koristi u kvalitativnom smislu i općenito opisuje bliskost slaganja rezultata mjerenja sa «stvarnom» vrijednošću mjerene veličine. Od dva mjerenja iste veličine tačnije je ono kome je pridružena manja mjerna nesigurnost.

Jedan od primarnih problema u mjeriteljstvu je kako procijeniti mjernu nesigurnost rezultata mjerenja. Tradicionalne metode procjene mjerne nesigurnosti temeljile su se na iskustvu osobe koja je provodila mjerenje. Posljednjih godina su uloženi napor u cilju iznalaženja matematičkih modela i opštih pravila za procjenu i iskazivanje mjernih nesigurnosti. Skupina stručnjaka iz međunarodnih organizacija sa područja mjeriteljstva (*ISO, IEC, OIML, CIPM, IUPAC*), su izradili uputstva za iskazivanje mjerne nesigurnosti *ISO Guide to the Expression of Uncertainty Measurement - GUM*. Prihvatanjem međunarodnog dogovora za iskazivanje mjerne nesigurnosti omogućeno je nedvosmisleno iskazivanje i upoređivanje rezultata mjerenja dobivenim u različitim kalibracionim i ispitnim laboratorijama. U skladu sa *GUM*-om evropska organizacija European Cooperation for Accreditation (*EA*) izdaje dokument *EA-4/02 – Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. Ovaj dokument se bazirao na metode koje se koriste u kalibracionim laboratorijama i opisao je način proračuna i iskazivanja nesigurnosti rezultata mjerenja prema *GUM*-u. Prema ovom dokumentu nesigurnost se iskazuje statistički, određenim područjem ili intervalom u kojem se sa navedenom vjerovatnoćom očekuje da leži vrijednost mjerene veličine. U statistici se takav odsječak naziva intervalom povjerenja i područjem mjerne nesigurnosti, šematski prikazano na slici I-19. Granice intervala povjerenja oko procjene mjerene veličine X izražavaju se kao $X \pm U(X)$. Veličina $U(X)$ zavisi o slučajnoj promjenljivosti mjerenja, nepoznatim sistemskim djelovanjima i nivoa povjerenja [30].



Slika I-19. Interval nesigurnosti procjene mjerene veličine

Ako je izvršen veoma veliki broj n ponovljenih mjerenja, na osnovu rezultata mjerenja $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ može se izračunati srednja vrijednost μ kao njihova aritmetička sredina:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Prilikom mjerenja, ne može se vršiti beskonačno mnogo mjerenja već samo konačno n mjerenja, pa je ocjena srednje vrijednosti data izrazom:

$$x_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Svaki pojedini rezultat mjerenja odstupa od stvarne vrijednosti μ za veličinu devijacije:

$$d_i = x_i - \mu$$

Na osnovu ovoga mogu se definisati apsolutna i relativna greška mjerenja.

Apsolutna greška mjerenja neke veličine x definiše se kao razlika izmjerene vrijednosti i njene "stvarne" vrijednosti, a relativna greška mjerenja predstavlja odnos između apsolutne greške i "stvarne" vrijednosti mjerene veličine. Treba naglasiti, da poznata vrijednost neke veličine ne mora biti i njena "stvarna" vrijednost.

Apsolutna greška mjerenja izražava se u jedinicama mjerne veličine, a računa se:

$$\Delta a = x_{sr} - \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{sr} - x_i|$$

Relativna greška (δ_x) neke mjerene veličine x može se iskazati:

$$\delta_x = \frac{\Delta a}{a_{sr}} \cdot 100$$

Ovo je stari, dugo korišteni pristup rezultatu mjerenja, koji se zasnivao na analizi greške mjerenja (sistematska greška). Prema ovom pristupu rezultat mjerenja je sadržavao samo ocjenu vrijednosti neke mjerene veličine x_{sr} , dok rezultat analize greške, od strane onoga ko je obavio mjerenje, najčešće nije predan korisniku tog rezultata, što je moglo da prouzrokuje donošenje pogrešnih zaključaka, npr. prilikom upoređivanja takvog rezultata sa vrijednostima navedenim u odgovarajućim specifikacijama, ili rezultatima dobivenim na nekom drugom uređaju ili u nekom drugom laboratoriju [29].

Odstupanja srednje od «stvarne» vrijednosti, zbog velikog broja nezavisnih parametara, istraživali su matematičari smatrajući da je greška slučajna. Zaključili su da svako mjerenje ima vjerovatnoću pojave, koje dovodi do greške. Slučajna greška može se uočiti samo sa više uzastopnih mjerenja iste veličine, tj. ne može se odrediti već se procjenjuje uz pomoć matematičke statistike i teorije vjerovatnoće. Ako se mjeri više veličina istovremeno, slučajna greška će se uočiti ako se izvrši više mjerenja a istovremeno se kontrolišu spoljašnji faktori i drže na istom nivou.

Mjerenjem jedne veličine dobije se niz diskretnih vrijednosti: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Prilikom svakog mjerenja učinjena je greška: $a_i = x_i - x$, za $i = 1, 2, \dots, n$.

Ako se sve greške saberu, iz dobijenog zbira slijedi da je «stvarna» vrijednost:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

Prvi član jednačine je srednja vrijednost x_{sr} , a drugi član je greška srednje vrijednosti, koja teži nuli za beskonačan broj mjerenja. Idealno bi bilo mjerenje ponoviti beskonačan broj puta. Tada se za «stvarnu» vrijednost mjerene veličine može smatrati da je srednja vrijednost. Iz praktičnih razloga broj mjerenja je ograničen, pa se statističkim metodama procjenjuje greška srednje vrijednosti, tj. procjenjuje se vjerovatnoća sa kojom se «stvarna» vrijednost mjerene veličine x zamjenjuje srednjom vrijednošću x_{sr} .

Ako se greška srednje vrijednosti $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$ dovede u vezu sa standardnim odstupanjem σ , tada je:

$$x = x_{sr} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}} = x_{sr} \pm C$$

gdje C označava pouzdanost, kojom je određena srednja vrijednost. Za precizna mjerenja uzima se $n > 30$.

3.1 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 [18, 30]:

- 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,
- nedovoljno tačne vrijednosti konstanti ili drugih parametara dobijenih iz spoljašnjih uticaja a korištenih u proračunu,
- pretpostavke u metodama i procedurama mjerenja,
- varijacije u ponovljenim mjerenjima mjerene veličine koje se ponavljaju pod skoro identičnim uslovima.

Navedeni izvori nesigurnosti, koji se uzimaju u razmatranje prilikom ocjene mjerne nesigurnosti, pokazuju da se ocjena nesigurnosti mjerenja suštinski razlikuje od proračuna greške mjerenja. U nesigurnost posmatranog uređaja ulazi i nesigurnost etalona sa kojim je izvršena njegova kalibracija. Ovakav postupak se koristi i pri ocjeni nesigurnosti korištenog etalona koji se kalibriše etalomom višeg mjeriteljskog nivoa. Procjena nesigurnosti primarnog etalona, pored ostalih izvora nesigurnosti, uzima u obzir i nesigurnost usljed nepotpune definisanosti mjerene veličine. Na ovaj način obezbjeđuje se da nesigurnost nekog uređaja, bilo kojeg mjeriteljskog nivoa, uzme u obzir sve značajne izvore nesigurnosti, od nesigurnosti zbog nepotpune definisanosti mjerene veličine do onih koje su vezane samo za posmatrani uređaj, čime je obezbjeđeno da nesigurnost ocjene rezultata mjerenja na bilo kom uređaju uključi sve nesigurnosti koje su se javile tokom mjerenja posmatrane veličine na bilo kom mjeriteljskom nivou, jer one realno doprinose nesigurnosti rezultata dobivenih na posmatranom uređaju. Pristup sa stanovišta greške mjerenja podrazumijeva da je mjerenje posmatrane veličine na nekom od viših mjeriteljskih nivoa bilo savršeno izvedeno, jer se na izvođenju mjerenja na nižim mjeriteljskim nivoima nije uzimao u obzir bilo koji pokazatelj nasavršenosti mjerenja na višim mjeriteljskim nivoima [31].

3.2 Statistički temelj za procjenu mjerne nesigurnosti

Prema dokumentu EA/4-02: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, mjerna nesigurnost se sastoji od više doprinosa koji se prema načinu kvantifikacije mogu razvrstati na:

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

Svaki izvještaj o mjernoj nesigurnosti treba sadržavati potpun popis doprinosa sa navodom metode korištene za izračunavanje svakog pojedinačnog doprinosa.

Prema dokumentu EA/4-02 mjerna nesigurnost se može iskazati kao:

- standardna mjerna nesigurnost - to je nesigurnost rezultata mjerenja izražena standardnim odstupanjem,
- kombinovana standardna mjerna nesigurnost - predstavlja nesigurnost rezultata mjerenja dobivena iz vrijednosti nekoliko drugih veličina,
- proširena mjerna nesigurnost - predstavlja veličinu kojom se određuje raspon rezultata mjerenja za koji se očekuje da obuhvata značajnu širinu raspodjele vrijednosti koji se mogu pripisati mjerenoj veličini.

Uobičajeno je da se mjerna nesigurnost procjenjuje iz matematičkog modela mjerenja. Mjerena veličina Y ili izlazna veličina funkcionalno je zavisna od većeg broja ulaznih veličina $X_1, X_2, \dots, X_n$

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

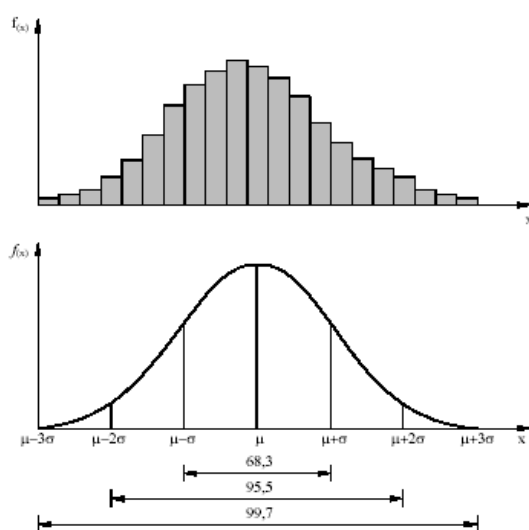
Ulazne veličine $X_1, X_2, \dots, X_n$ se mogu posmatrati kao mjerene veličine i one same mogu zavisiti od drugih veličina, uključujući ispravke, faktore ispravki zbog sistemskih djelovanja dovodeći tako do složenog funkcijskog odnosa.

Izlazna veličina Y , kojoj odgovara procjena izlaze veličine y , dobije se procjenom ulaznih veličina x_i za vrijednost ulazne veličine X_i . Shodno tome, procjena izlaze veličine y rezultata mjerenja daje se izrazom:

$$y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Rezultat mjerenja se sastoji od procjene vrijednosti mjerne veličine i nesigurnosti te procjene:

$$y \pm U$$



Procjena ulaznih veličina bazirana je na statističkoj analizi serije ponovljenih mjerenja pod istim uslovima. Čak i ako se posebnim ispitivanjem i provjerom mjerne metode isključi mogućnost sistematskih djelovanja, na mjerenje će ipak uticati faktori koje nije moguće kontrolisati i koji se mijenjaju od jednog do drugog mjerenja ali podliježu nekoj zakonitosti. Ta zakonitost se opisuje normalnom krivom raspodjele, slika I-20, a njen oblik zavisi od vrijednosti parametara srednje vrijednosti μ i standardnog odstupanja σ [32].

Slika I-20. Normalna raspodjela mjerenih vrijednosti

Tip A ocjene nesigurnosti se zasniva na statistici ponovljenih mjerenja. U slučaju da se raspolaze većim brojem nezavisnih mjerenja vrijednosti neke ulazne veličine, najbolja očekivana vrijednost μ_q veličine q , koja se mijenja na slučajan način i za koju je u istim uslovima mjerenja dobiveno n nezavisnih mjerenja q_i , je aritmetička sredina ili srednja vrijednost $\bar{q}$ od n mjerenja:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

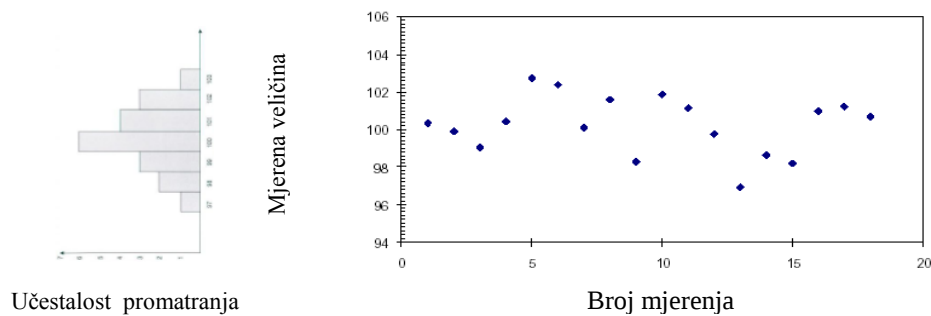
Ako su mjerenja izvedena u više mjernih serija sa po $n_1=n_2=\dots=n_i=\dots=n_p$ ponovljenih mjerenja, srednja vrijednost svih mjerenja je [26]:

$$\bar{q} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \bar{q}$$

gdje je:

p – broj mjernih serija

Ako se u toku mjerenja rezultat x_i , slika I-21, pojavi f_i puta, gdje je $i=1, 2, \dots, n$,



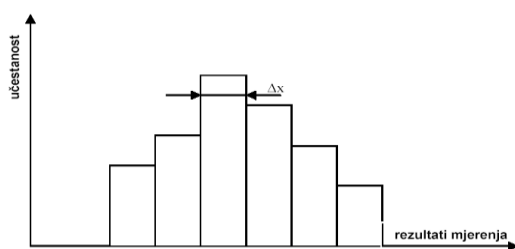
Slika I-21. Statistička analiza očitanih vrijednosti [31]

tada je:

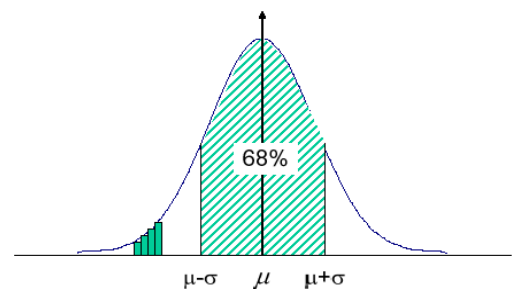
$$x_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{n}$$

gdje je je:

$\frac{f_i}{n}$ relativna frekvencija ili učestalost pojave rezultata x_i .



Slika I-22. Histogram šest diskretnih rezultata mjerenja jedne veličine [33]



Slika I-23. Normalna ili Gauss-ova kriva raspodjele [33]

Ako se, dalje, pretpostavi da se sve vrijednosti veličine x u intervalu $x_i \pm (\Delta x/2)$, gdje su Δx proizvoljno odabrani i dovoljno mali intervali, koji se javljaju sa istom frekvencijom f_i , odnosno relativnom frekvencijom f_i/n , dobija se histogram kao na slici I-22.

Za povećani broj mjerenja, tj. kada $n \rightarrow \infty$, interval $\Delta x \rightarrow 0$, umjesto histograma dobije se kontinuirana kriva raspodjele gustine vjerovatnoće, slika I-23. Ako se pretpostavi da su jednako vjerovatni rezultati sa negativnom i pozitivnom greškom, tj. da su odstupanja

simetrična u odnosu na „stvarnu“ vrijednost dobijena kriva se naziva normalnom ili Gauss-ovom krivom raspodjele.

Prvi metod tipa A ocjene standardne nesigurnosti se bazira na slijedećim koracima [18]:

- Odrediti proračunom vrijednost eksperimentalne varijanse $s^2(x_i)$, koja je data izrazom:

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

Pozitivan kvadratni korijen eksperimentalne varijanse daje eksperimentalnu standardnu devijaciju $s(x_i)$.

- Nakon toga, određuje se eksperimentalna varijansa srednje vrijednosti, odnosno varijansa aritmetičke sredine $\bar{x}_i$, tj.

$$s^2(\bar{x}_i) = \frac{s^2(x_i)}{n-1}$$

Pozitivan kvadratni korijen ove varijanse daje eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti $s(\bar{x}_i)$.

- Standardna nesigurnost $u(\bar{x}_i)$ pridružena procjeni ulazne veličine x_i je ustvari eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti, tj.:

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i)$$

Drugi metod tipa A ocjene standardne nesigurnosti izvodi se uz pomoć kombinovane ili odabrane procjene varijanse s_p^2 , koja bolje karakteriše rasipanje od procijenjenog standardnog odstupanja postignutog ograničenim brojem mjerenja.

Varijansa srednje aritmetičke vrijednosti se procijenjuje i pomoću jednačine:

$$s^2(\bar{x}_i) = \frac{s_p^2}{n}$$

pa se standardna mjerna nesigurnost dobija primjenom jednačine:

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i)$$

Procjena x_i ulazne veličine X_i često se dobiva iz krive koja je dobivena prilagođavanjem eksperimentalnih podataka metodom najmanjih kvadrata. Procijenjene varijanse i odgovarajuće standardne nesigurnosti prilagođenih parametara, koji opisuju krivu, mogu se izračunati nekim od statističkih procedura.

Tip B ocjene standardne nesigurnosti pripisan procjeni x_i , se izvodi sredstvima koja se razlikuju od statističke analize serije mjerenja. Standardna nesigurnost $u(x_i)$ se ocjenjuje naučnim prosuđivanjem zasnovanim na dostupnim informacijama o mogućoj promjenljivosti ulazne veličine X_i .

Informacije i vrijednosti koje pripadaju ovoj kategoriji se izvode iz [18, 27]:

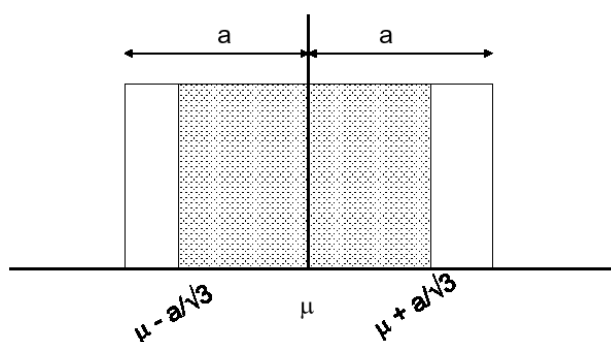
- podataka prethodnog mjerenja,
- iskustva sa materijalima i instrumentima ili općeg poznavanja ponašanja i osobina materijala i instrumenata,
- specifikacije proizvođača,

- podataka datih u certifikatima o kalibraciji,
- nesigurnosti dodijeljene referentnim podacima uzetim iz priručnika.

Ispravna primjena raspoloživih informacija za ocjenu nesigurnosti tipa B upućuje na sticanje iskustava i opštih znanja, a to se može naučiti samo kroz praksu.

Dobro zasnovana ocjena standardne nesigurnosti tipa B može biti isto sigurna, kao što je i ocjena standardne nesigurnosti tipa A, posebno u situacijama kada je ocjena tipa A zasnovana na relativno malom broju statističkih nezavisnih mjerenja.

U zavisnosti od ulazne veličine različit je pristup njenoj procjeni. Npr, ako je poznata samo jedna vrijednost ulazne veličine tada se samo ona i upotrebljava za procjenu i treba je, ako nigdje nije navedena, odrediti na temelju iskustva. Ako se za veličinu X_i može pretpostaviti raspodjela vjerovatnoće, tada za procjenu x_i ulazne veličine, odnosno njenu nesigurnost $u(x_i)$ treba uzeti očekivanu vrijednost i drugi korijen varijanse te raspodjele.



Ako se procjena x_i ulazne veličine X_i temelji na procjeni granica intervala pojavljivanja (od $-a$ do $+a$), uz jednaku vjerovatnoću pojavljivanja unutar cijelog intervala i vjerovatnoću da ulazna veličina ne leži izvan granica intervala (od $-a$ do $+a$), tada se standardna nesigurnost dobije iz pravougaone raspodjele, slika I-24. [31].

Slika I-24. Pravougaona raspodjela

Procjena x_i ulazne veličine X_i jednaka je središtu intervala

$$x_i = \frac{a_- + a_+}{2}$$

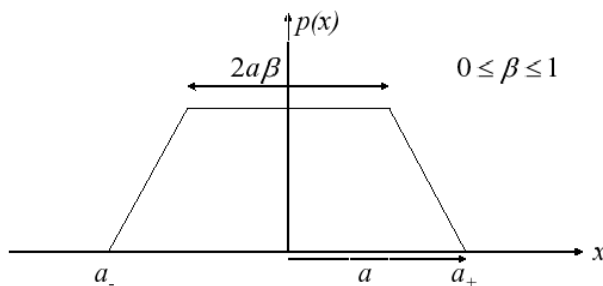
odnosno, pridružena varijansa jednaka je:

$$u^2(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12}$$

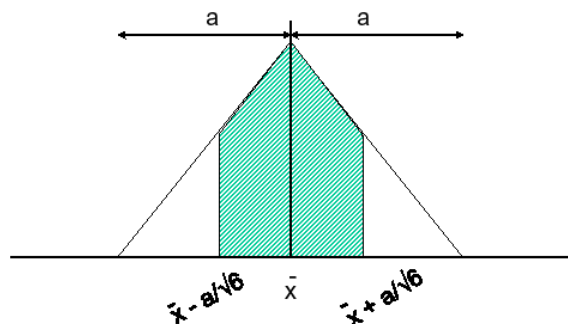
Ako se razlika granica intervala ($a_+ - a_-$) označi sa $2a$, onda je:

$$u^2(x_i) = \frac{(2a)^2}{12} = \frac{4a^2}{12} = \frac{a^2}{3}$$

U mnogim slučajevima realnije je očekivati da vrijednosti u blizini granica intervala budu manje vjerovatne od vrijednosti u blizini središta intervala. Tada se umjesto pravougaone raspodjele koristi trapezna raspodjela sa istim bočnim stranicama (istostranični trapez), slika I-25. i osnovicom jednakom $(a_+ + a_-) = 2a$ i širinom gornje stranice jednakom $2a\beta$, gdje je $0 \leq \beta \leq 1$. Kada $\beta \rightarrow 1$ trapezna raspodjela teži pravougaonoj, dok za $\beta = 0$ teži trougaonoj raspodjeli, slika I-26. [33].



Slika I-25. Trapezna raspodjela



Slika I-26. Trougaona raspodjela

Uz pretpostavku trapezne raspodjele procjena x_i ulazne veličine X_i je

$$x_i = \frac{(a_- + a_+)}{2}$$

a pridružena varijansa jednaka je:

$$u^2(x_i) = \frac{a^2(1 + \beta^2)}{6}$$

koja za $\beta=0$, odnosno za trougaonu raspodjelu postaje jednaka:

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{6}$$

Kombinovana standardna nesigurnost veličine y , gdje je y procjena mjerene veličine Y dobiva se kombinovanjem standardnih nesigurnosti procjene ulaznih veličina $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$

Ulazne veličine $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ mogu biti:

- međusobno nezavisne ili nekorelisane,
- međusobno zavisne ili korelisane.

Ako promjena jedne ulazne veličine ne izaziva promjenu drugih ulaznih veličina, kvadrat kombinovane standardne nesigurnosti procjene izlazne veličine y dat je izrazom:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^n (c_i \cdot u(x_i))^2$$

odnosno, kombinovana standardna nesigurnost data je izrazom:

$$u_c(y) = \sqrt{c_1^2 u^2(x_1) + c_2^2 u^2(x_2) + \dots + c_n^2 u^2(x_n)}$$

gdje je $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ koeficijent osjetljivosti c_i i opisuje u kojoj mjeri na procjenu y izlazne veličine utiče promjena procjene x_i ulazne veličine.

Postoje tri metoda za određivanje koeficijenta osjetljivosti [31]:

- eksperimentalnim mjerenjem u specifičnim radnim uslovima $c_i = \frac{\Delta f}{\Delta x_i}$, pri čemu procjena ulazne veličine x_i varira sa malom promjenom Δx_i ulazne veličine, npr, promjena dužine u nekom temperaturnom intervalu,

- parcijalnom derivacijom modela funkcije, analitički metod $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$; c_i daje informaciju kako se rezultat (procjena izlazna veličina y) mijenja sa promjenom svake procjene ulazne veličine x_i ,
- numerički izračunat:

$$c_i = \frac{\Delta f}{\Delta x_i} = \frac{f(x_i + \Delta x_i) - f(x_i)}{\Delta x_i} = \frac{f(x_i + u(x_i)) - f(x_i)}{u(x_i)}$$

pri čemu $u(x_i)$ je malo povećanje u x_i tako da se može koristiti za izračunavanje odgovarajuće promjene u modelu funkcije f .

Kada su ulazne veličine međusobno zavisne ili korelisane u proračun se moraju uzeti i te korelacije. Tada se kombinovanoj nesigurnosti dodaju i kovarijantni članovi pa je kombinovana standardna nesigurnost procjene izlazne veličine data izrazom:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)$$

Stepen međusobne zavisnosti ulaznih veličina određuje procijenjeni korelacijski koeficijent $r(x_i, x_j)$:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) u(x_j)}$$

Ove korelacije se procjenjuju na osnovu iskustva ili ispitivanja njihovog stvarnog djelovanja.

Kovarijansa pridružena procjenama dviju ulaznih veličina može se smatrati nevažnom ako su [30]:

- ulazne veličine nezavisne jer prikazuju veličine koje su rezultat različitih određivanja koja su provedena nezavisno,
- ako se bilo koja od ulaznih veličina može smatrati stalnom,
- ako istraživanja ne daju podatke koji pokazuju postojanje korelacije između ulaznih veličina.

Proširena mjerna nesigurnost određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvata veliki skup vrijednosti koje bi mogle s razlogom biti pridružene mjerenoj veličini. Proširena mjerna nesigurnost dobiva se umnoškom kombinovane standardne nesigurnosti $u_c(y)$ sa faktorom prekrivanja k i označava se sa U [34].

$$U(y) = k \cdot u_c(y),$$

U slučajevima kada se mjerenoj veličini može pridružiti normalna raspodjela upotrebljavat će se uobičajeni faktor prekrivanja $k=2$. Proširena nesigurnost odgovara nivou povjerenja od približno 95%. Ovi uslovi su uglavnom ispunjeni kod kalibracija.

Vrijednost faktora k zavisi od odabranog nivoa povjerenja i od raspodjele vjerovatnoće izlazne veličine Y . Prema centralnom graničnom teoremu, raspodjela vjerovatnoće izlazne veličine Y teži normalnoj, kada broj ulaznih veličina raste i to zbog toga što kombinovana standardna nesigurnost ocjene izlazne veličine $u_c(y)$ postaje sve veća u odnosu na bilo koji od doprinosa kombinovanoj standardnoj nesigurnosti od pojedinih ulaznih veličina.

U certifikatu o kalibraciji potrebno je navesti Izjavu o proširenoj mjernoj nesigurnosti, načinu njenog određivanja i vrijednost faktora prekrivanja k u cilju pravilnog tumačenja i korištenja

date vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti. Prema dokumentu EURAMET cg-4 i EA-4/02 ova Izjava glasi:

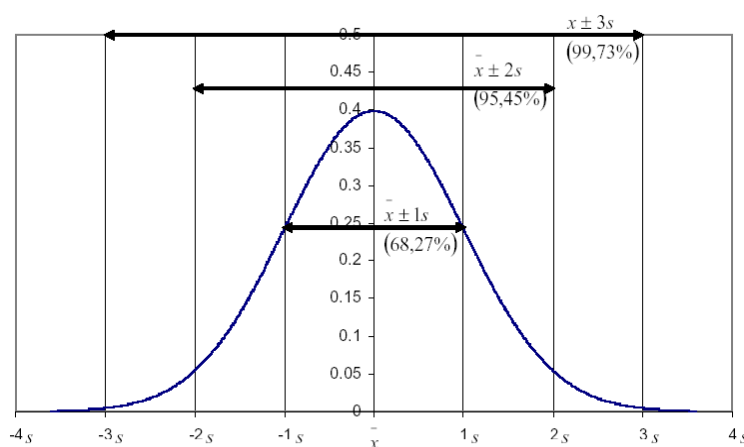
Navedena mjerna nesigurnost se daje kao standardna mjerna nesigurnost pomnožena sa faktorom prekrivanja $k=2$, koja za normalnu raspodjelu odgovara nivou povjerenja od približno 95%. Standardna mjerna nesigurnost određena je u skladu sa dokumentom EA-4/02.

U tabeli I-5. date su vrijednosti faktora prekrivanja k za odgovarajuće nivoe povjerenja za normalnu raspodjelu.

Tabela I-5. Faktori prekrivanja k za odgovarajuće nivoe povjerenja za normalnu raspodjelu

Nivo povjerenja P , %	68,27	90	95	95,45	99	99,73
Faktor prekrivanja k	1	1,65	1,96	2	2,58	3

Grafički prikaz normalne raspodjele sa odgovarajućim nivoom povjerenja za karakteristične vrijednosti faktora prekrivanja k dat je na slici I-27. [33].



Slika I-27. Grafički prikaz normalne raspodjele za karakteristične vrijednosti faktora k

Iskazivanje mjernog rezultata treba prilagoditi namjeni. Ne može se očekivati da se rezultat mjerenja isto iskazuje u naučnoistraživačkim radovima i svakodnevnim izvještajima kod rutinskih mjerenja. U naučnoistraživačkim radovima i dokumentima vrhunskog mjeriteljskog nivoa rezultat mjerenja treba sadržavati sve relevantne podatke koji omogućavaju upotrebu, provjeru i obnavljanje navedenog rezultata i njegove mjerne nesigurnosti. Najmanje što treba navesti je [35]:

- opis postupka mjerenja,
- opis postupka izračunavanja mjernog rezultata na temelju izmjerenih vrijednosti i ostalih ulaznih podataka,
- vrijednost svih komponenti nesigurnosti, način procjene ukupne nesigurnosti mjernog rezultata,
- dovoljno detaljno sve korake obrade mjerenja tako da se mogu pratiti i ponoviti,
- sve ispravke i procjene njihove nesigurnosti,
- sve konstante koje se upotrebljavaju pri obradi mjerenja i njihove nesigurnosti.

U krajnjem iskazu dovoljno je mjernu nesigurnost iskazivati dvjema značajnim ciframa a vrijednost mjernog rezultata zaokružiti na nivou vrijednosti zadnje značajne cifre nesigurnosti. U međurezultatima preporučuje se zadržati jednu cifru više. Mjerna nesigurnost može se iskazati u relativnom ili apsolutnom iznosu.

3.3 Postupak za procjenu mjerne nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona sile (EA4-02, EURAMET cg-4)

Standard BAS EN ISO 376:2005 daje vodič za procjenu mjerne nesigurnosti koja se bazira na pristupu procjene koju daje dokument EURAMET /cg-04/v.01:2011. Prema ovom vodiču i proceduri kalibracije definisanoj u standardu postoje dvije različite metode kalibracije:

- metoda koja se bazira na kalibraciji samo specifične sile,
- metoda koja se bazira na kalibraciji kompletnog mjernog područja sa primijenjenim silama koje su izračunate u funkciji mjerenja izlaznog signala korištenjem interpolacione jednačine.

Budući da je kalibracija prenosnih etalona Mehaničkog laboratorija Instituta realizovana za kompletno mjereno područje u nastavku je data procedura procjene nesigurnosti za ovu metodu.

Matematički model za određivanje mjerne nesigurnosti prenosnog etalona sile sastojao se iz pet faza:

1. Određivanje standardnih nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije i karakteristika prenosnog etalona a na osnovu proračunatih relativnih grešaka,
2. Određivanje standardne kombinovane nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona, u_{cpet} ,
3. Određivanje nesigurnosti referentnog etalona, u_{ref} ,
4. Određivanje kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona, u_c ,
5. Određivanje proširene nesigurnosti prenosnog etalona, U .

Standardne nesigurnosti procijenjene iz relativnih grešaka izračunatih iz rezultata kalibracije i karakteristika prenosnog etalona su [36]:

- Relativna standardna nesigurnost vezano za obnovljivosti sa rotacijom, u_b ,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za ponovljivosti bez rotacije, $u_{b'}$,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za rezoluciju indikatora, u_{res} ,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za reverzibilnost ili histerezu, u_v ,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za drift nule, u_{fo} ,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za varijaciju temperature, u_t ,
- Relativna standardna nesigurnost vezano za interpolaciju, u_{fc} .

Relativna standardna nesigurnost vezano za obnovljivosti sa rotacijom, u_b je, za svaki primijenjeni nivo sile, standardno odstupanje srednjeg izmjerenog izlaznog signala X_r , koje se dobije kod različitih položaja rotacije mjerne ćelije kod povećanja sile, izraženo kao relativna vrijednost i temelji se na tipu A raspodjele. Računa se iz slijedeće jednačine:

$$u_b = \frac{1}{|X_r|} \cdot \sqrt{\frac{1}{3-1} \cdot \sum_{i=1,3,5} (X_i - X_r)^2} \dots\dots\dots (2-10)$$

Relativna standardna nesigurnost vezano za ponovljivosti bez rotacije, $u_{b'}$ je, za svaki primijenjeni nivo sile, doprinos zbog ponovljivosti izmjerenih izlaznih signala kod povećanja sile u poziciji 0° mjerne ćelije, izražava se kao relativna vrijednost i temelji se na pravougljnoj raspodjeli. Računa se iz slijedeće jednačine:

$$u_{b'} = \frac{b}{2 \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2-11)$$

Relativna standardna nesigurnost vezano za rezoluciju sistema za očitavanje sile, u_{res} je, razlika vrijednosti izlaznog signala od dva očitavanja (očitanje kod nule i očitavanje kod primjenjene sile). Rezolucija indikatora, prema tome treba uključiti dvije pravougaone raspodjele, svaku sa standardnom nesigurnošću od:

$r/(2\sqrt{3})$ gdje je r rezolucija, izražena u jedinici sile. Ovo je jednako jednoj trougaonoj raspodjeli od $r/(\sqrt{6})$, i izražena je za svaki nivo sile kao relativna vrijednost:

$$u_{res} = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \frac{r}{F} \dots\dots\dots (2-12)$$

Relativna standardna nesigurnost vezano za reverzibilnost ili histerezu, u_v je, za svaki primijenjeni nivo sile, doprinos zbog razlike u izmjerenim vrijednostima izlaznih signala kod mjernih serija kod povećanja sile i odgovarajućih mjernih serija kod smanjenja sile u pozicijama mjerne ćelije 120° i 240° , izražava se kao relativna vrijednost i temelji se na pravougloj raspodjeli. Računa se iz slijedeće jednačine:

$$u_v = \frac{v}{2 \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2-13)$$

Relativna standardna nesigurnost vezano za drift nule, u_{fo} je doprinos nesigurnosti koji je rezultat mogućnosti da pokazivanje nule izlaznog signala varira između mjernih serija - slijedeće mjerenje izlaznog signala. Ovaj efekat se izražava kao relativna vrijednost i temelji se na pravougloj raspodjeli. Računa se iz jednačine:

$$u_{fo} = \frac{f_o}{2 \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots (2-14)$$

Relativna standardna nesigurnost vezano za varijaciju temperature, u_t je posljedica varijacije temperature u toku kalibracije. Osjetljivost etalona sile na varijaciju temperature treba se odrediti, bilo testom ili što je uobičajeno, specifikacijom proizvođača. Ova komponenta uzima istu vrijednost za svaki nivo sile i izražava se kao relativna vrijednost slijedećom jednačinom:

$$u_t = K \cdot \frac{\Delta T}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2-15)$$

Važno je napomenuti da, za etalone koji imaju temperaturnu kompenzaciju, ova komponenta će generalno biti neznatna (K je $0,000\ 05\ ^\circ C^{-1}$) tako da se može zanemariti.

Relativna standardna nesigurnost vezano za interpolaciju, u_{fc} je procjena doprinosa za svaku kalibracionu silu kao razlika između srednjeg izmjerenog signala od mjernih serija kod povećanja sile i vrijednosti izračunate iz interpolacione jednačine izražena kao relativna vrijednost.

$$u_{fc} = \frac{f_c}{2 \cdot \sqrt{6}} \dots\dots\dots (2-16)$$

Standardna kombinovana nesigurnost procijenjena iz rezultata kalibracije prenosnog etalona u_{cpet} predstavlja kvadratni korijen iz sume kvadrata umnožaka standardnih nesigurnosti procijenjenih iz rezultata kalibracije prenosnog etalona i pripadajućih koeficijenata osjetljivosti:

$$u_{cpet} = \sqrt{c_b^2 \cdot u_b^2 + c_b^2 \cdot u_b^2 + c_{res}^2 \cdot u_{res}^2 + c_v^2 \cdot u_v^2 + c_{fo}^2 \cdot u_{fo}^2 + c_t^2 \cdot u_t^2 + c_{fc}^2 \cdot u_{fc}^2} \dots\dots\dots (2-17)$$

Budući da su sve ulazne veličine nezavisne i da su procijenjene iz relativnih odstupanja kao relativne standardne nesigurnosti odgovarajući koeficijenti osjetljivosti jednaki su 1.

Standardna nesigurnost referentnog etalona u_{ref} je uglavnom jednaka *CMC* (*Calibration and measurement capability* – najbolja mjerna mogućnost) laboratorija za specificirano mjerno područje i koji predstavlja proširenu mjernu nesigurnost U podjeljenu sa faktorom prekrivanja k za odgovarajući nivo povjerenja kako je navedeno u certifikatu o kalibraciji referentnog etalona:

$$u_{ref} = \frac{U}{k} \dots\dots\dots (2-18)$$

Kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona, u_c predstavlja kvadratni korijen iz sume kvadrata standardne kombinovane nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona, u_{cpet} i nesigurnosti referentnog etalona, u_{ref} :

$$u_c = \sqrt{u_{cpet}^2 + u_{ref}^2} \dots\dots\dots (2-19)$$

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

$$U = u_c \cdot k \dots\dots\dots (2-20)$$

U tabeli I-6 date su vrijednosti relativnih standardnih i relativne proširene mjerne nesigurnosti za prenosne etalone sile koji ispunjavaju sve klasifikacijske kriterije prema normi BAS EN ISO 376:2005 za specificirane klase etalona [36].

Tabela I-6: Relativne standardne i proširene mjerne nesigurnost za specificirane klase etalona

Klasa	u_{cal}	$u_{b'}$	u_b	u_{res}	u_v	u_{f0}	u_{fc}	Relativna proširena mjerna nesigurnost
	%							
00	0,005	0,017	0,014	0,010	0,014	0,012	0,025	0,08
0.5	0,010	0,033	0,029	0,020	0,029	0,025	0,050	0,16
1	0,025	0,067	0,058	0,041	0,058	0,050	0,100	0,32
2	0,050	0,133	0,115	0,082	0,115	0,100	0,200	0,64

Da bi za određeni nivo sile, odnosno mjerno područje prenosni etalon bio klasificiran u specifičnu klasu, sve vrijednosti relativnih standardnih nesigurnosti, odnosno relativne proširene mjerne nesigurnosti trebaju biti u granicama specificiranim za određenu klasu.

4. KALIBRACIONA MJERNA MOGUĆNOST LABORATORIJA- CMC

Kalibraciona mjerna mogućnost – (*Calibration Measurement Capability CMC*) definiše se kao najmanja mjerna nesigurnost koju laboratorij može postići u okviru svog ovlaštenja kada provodi više ili manje svakodnevnu kalibraciju gotovo idealnih mjernih etalona čija je svrha definisati, ostvarivati, čuvati ili obnavljati jedinicu te veličine ili jednu ili više njenih vrijednosti ili kada provodi više ili manje svakodnevnu kalibraciju gotovo idealnih mjerila oblikovanih za mjerenje te veličine [37].

Shodno definiciji *CMC*-a, procjena kalibracione mjerne mogućnosti laboratorija ovlaštenih za kalibraciju, temelji se na metodi opisanoj u dokumentu EA-4/02 i najčešće se potvrđuje eksperimentom. Ovlašteni kalibracioni laboratorij mora *CMC* postizati u redovnom radu a u skladu sa svojim ovlaštenjima.

CMC kalibracionog laboratorija predstavlja važan podatak o mogućnosti laboratorija iz slijedećih razloga:

- CMC laboratorija koristi kupcima usluga kalibracionih ovlaštenih laboratorija da procijene prikladnost laboratorija da za njih realizuje usluge kalibracije ispitnih mašina,
- CMC laboratorija omogućava poređenje mjerne mogućnosti različitih kalibracionih ovlaštenih laboratorija koje su ovlastile različita akreditaciona, odnosno ovlaštena tijela.

Budući da se CMC laboratorija mora dokazati eksperimentom važno je napomenuti da CMC ne smije zavisiti od tehničkih karakteristika ispitne mašine koja se koristi za eksperiment, odnosno, eksperiment treba biti proveden na ispitnoj mašini čije su tehničke nesavršenosti dovedene na najmanju moguću mjeru. Procjenu CMC-a laboratorij može provjeriti učešćem u interlaboratorijskim komparacijama ili kroz provjeru osposobljenosti.

Kod realizacije usluga kupcima kalibracioni laboratorij, u okviru svog ovlaštenja, ne smije dati mjernu nesigurnost manju od CMC, odnosno laboratorij može dati mjernu nesigurnost najmanje vrijednosti CMC ili veću. CMC se iskazuje kao proširena mjerna nesigurnost sa faktorom prekrivanja $k=2$ i data je u području akreditacije kalibracionog laboratorija te je preko web stranica akreditacionih tijela dostupan kupcima usluga kalibracije.

CMC se iskazuje brojčano i treba se navesti da li se radi o apsolutnom ili relativnom iznosu.

4.1 Procedura za procjenu CMC

Ne postoji evropski ili međunarodni dokument koji definiše proceduru za procjenu CMC-a laboratorija, ali s obzirom na znanje vezano za sljedivost mjerenja i na samu definiciju CMC-a, može se postaviti matematički model za određivanje CMC-a za specificirano područje sile. CMC svakako mora uključiti vrijednost nesigurnosti prenosnog etalona koja u sebi uključuje sve nesigurnosti do primarnog, odnosno nacionalnog etalona sile, dugoročnu nestabilnost prenosnog etalona koja nije uzeta u obzir kod procjene mjerne nesigurnosti prilikom njegove kalibracije i doprinose koji proizilaze iz eksperimenta, odnosno iz rezultata kalibracije ispitne mašine.

Matematički model za procjenu CMC-a uključuje slijedeće:

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

4.1.1 Procjena kombinovane nesigurnosti vezane za prenosni etalon, u_{cpet}

Kombinovana nesigurnost vezana za prenosni etalon data je jednačinom:

$$u_{cpet} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{temp}^2} \dots\dots\dots(2-21)$$

Procedura procjene nesigurnosti prenosnog etalona sile data je u poglavlju 3.3 i izražena je kao proširena mjerna nesigurnost U . Budući da je nivo povjerenja 95 % i faktor prekrivanja $k=2$, standardna nesigurnost prenosnog etalona sile je:

$$u_{cal} = \frac{U}{k} \dots\dots\dots(2-22)$$

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:

$$d = \frac{X_{last} - X_{prev}}{X_{last}} \cdot 100 \dots\dots\dots(2-23)$$

U slučaju pravougaone raspodjele standardana nesigurnost zbog drifta prenosnog etalona je

$$u_{drift} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots(2-24)$$

Standardna nesigurnost zbog uticaja temperature se može zanemariti jer prenosni etaloni sile, tipa opisanih u ovo radu, imaju temperaturnu kompenzaciju.

4.1.2 Izvođenje eksperimenta – kalibracija ispitne mašine za silu

Kalibracija ispitnih mašina za silu realizuje se prema zahtjevima standarda BAS EN ISO 7500-1:2005 i odnosi se na kalibraciju sistema za mjerenje sile. Kalibracija se provodi na temperaturi od $+10^{\circ}C$ do $+35^{\circ}C$ i obavezno se zapisuje u sertifikat/izvještaj o kalibraciji. U toku kalibracije mora se osigurati stalnost temperature u granicama $\pm 2^{\circ}C$. Ako ovaj uslov nije zadovoljen primjenjuje se korekcionni faktor u skladu sa BAS EN ISO 376:2005. Kalibracija se vrši za svako mjerno područje mašine odvojeno. Ako se za kalibraciju jednog mjernog područja treba koristiti više prenosnih etalona, maksimalna sila primjenjena na etalonu manjeg mjernog područja mora biti ista kao i minimalna sila primjenjena na slijedećem etalonu većeg mjernog područja. Kalibracija za taj nivo sile realizuje se sa oba prenosna etalona.

Kalibracija se može realizovati na dva načina [38]:

- Konstantna indicirana sila, što znači da se za konstantnu vrijednost uzme vrijednost na mašini koja se kalibriše, a da se vrijednost sa sistema za očitavanje sile prenosnog etalona zapisuje,
- Konstantna stvarna sila, što znači da se vrijednost na sistemu za očitavanje sile uzme kao konstantna, a da se vrijednost koju pokazuje mašina koja se kalibriše zapisuje.

Za svaku odabranu kalibracionu tačku, odnosno za svaki odabrani nivo sile, računa se relativna greška tačnosti.

U slučaju konstantne indicirane sile relativna greška tačnosti se računa prema jednačini:

$$q = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \cdot 100 \dots\dots\dots(2-25)$$

U slučaju konstantne stvarne sile relativna greška tačnosti se računa prema jednačini:

$$q = \frac{\overline{F}_i - F}{F} \cdot 100 \dots\dots\dots(2-26)$$

Primijenjeni etaloni za kalibraciju moraju biti bolje ili iste klase kao i mašina koja se kalibriše.

Rezolucija analogne skale, r mašine koja se kalibriše, dobiva se kao odnos između debljine kazaljke/pointera i rastojanja između centara susjednih gradacija skale (interval skale). Preporučeni odnosi su 1/2, 1/5 ili 1/10. Rezolucija digitalne skale se uzima kao skok (porast) broja na numeričkom indikatoru/pokazivaču pod uvjetom da, kada motor i kontrolni sistemi rasterećenog uređaja rade, fluktuiranje vrijednosti na numeričkom indikatoru/pokazivaču nije veće od jednog porasta. Rezolucija skale se izražava u jedinici sile ili u jedinici one veličine u kojoj je ta skala data.

Mjerna ćelija, koja se koristi za kalibraciju, se pozicionira u uređaj koji se kalibriše i optereti najmanje tri puta od nule na skali mašine do maksimalne sile datog mjernog područja. Tri serije mjerenja trebaju biti urađene sa povećanjem sile i jedna sa smanjenjem sile u najmanje pet mjernih tačaka ravnomjerno raspoređenih po mjernom području. Kod svakog mjerenja mjerna ćelija se, u mašini koja se kalibriše, rotira za 120^0 i 240^0 , ili 180^0 i 360^0 u zavisnosti od konstrukcije same mašine. Za prvu mjernu tačku uzima se 20 % a za zadnju 100 % vrijednosti mjernog područja ispitne mašine. Ako se za mjerenje koriste sile ispod 20 % mjernog područja, mogu se dodatno kalibrisati tačke koje odgovaraju 10 %; 5 %; 2,5 %; 1 %; 0,5 %; 0,2 % i 0,1 % vrijednosti mjernog područja, ako za takve vrijednosti mašina zadovolji sa rezolucijom skale.

4.1.3 Određivanje relativnih grešaka procijenjenih iz rezultata kalibracije ispitne mašine i procjena pripadajućih nesigurnosti

Standardne nesigurnosti procijenjene iz relativnih grešaka izračunatih iz rezultata mjerenja na ispitnoj mašini su [36]:

- Relativna standardna nesigurnost vezano za ponovljivosti, 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_{f0} .

Relativna standardna nesigurnost vezana za ponovljivost, za svaki primjenjeni nivo sile, u slučaju kada je konstantna indicirana sila, je standardno odstupanje ocijenjene vrijednosti srednje greške i temelji se na tipu A raspodjele. Računa se iz slijedeće jednačine:

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \left(\frac{100}{F} \cdot \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{j=1}^n (F_j - \overline{F})^2} \right) \dots\dots\dots(2-27)$$

Ista nesigurnost u slučaju kada je konstantna stvarna sila, računa se prema jednačini:

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \left(\frac{100}{\overline{F}_i} \cdot \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{j=1}^n (F_{ij} - \overline{F}_i)^2} \right) \dots\dots\dots(2-28)$$

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

$$u_{res} = \frac{a}{2 \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots(2-29)$$

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

$$a = \frac{r}{F} \cdot 100 \dots\dots\dots(2-30)$$

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 pravougloj raspodjeli. Računa se iz slijedeće jednačine:

$$u_v = \frac{\nu}{2 \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots(2-31)$$

gdje je ν relativna greška histereze i kada se kalibracija realizuje sa konstantnom stvarnom silom, računa se prema jednačini:

$$\nu = \frac{F'_i - F_i}{F} \cdot 100 \dots\dots\dots(2-32)$$

Kada se kalibracija realizuje sa konstantnom indiciranom silom, relativna greška histereze računa se prema jednačini:

$$\nu = \frac{F' - F}{F} \cdot 100 \dots\dots\dots(2-33)$$

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 pravougloj raspodjeli. Računa se iz jednačine:

$$u_{f_0} = \frac{f_0}{2 \cdot \sqrt{3}} \dots\dots\dots(2-34)$$

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

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} \cdot 100 \dots\dots\dots(2-35)$$

4.1.4 Određivanje standardne kombinovane nesigurnosti

Standardna kombinovana nesigurnost predstavlja kvadratni korijen iz sume umnožaka kvadrata standardnih nesigurnosti i kvadrata pripadajućih koeficijenata osjetljivosti.

$$u_c = \sqrt{c_{cpet}^2 \cdot u_{cpet}^2 + c_{rep}^2 \cdot u_{rep}^2 + c_{res}^2 \cdot u_{res}^2 + c_v^2 \cdot u_v^2 + c_{f_0}^2 \cdot u_{f_0}^2} \dots\dots\dots(2-36)$$

Budući da su sve ulazne veličine nezavisne i da su procijenjene iz relativnih odstupanja kao relativne standardne nesigurnosti, odgovarajući koeficijenti osjetljivosti jednaki su 1, pa je standardna kombinovana nesigurnost data jednačinom:

$$u_c = \sqrt{u_{cpet}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_v^2 + u_{f_0}^2} \dots\dots\dots(2-37)$$

4.1.5 Određivanje proširene nesigurnosti U

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:

$$U = u_c \cdot k \dots\dots\dots(2-38)$$

Na ovaj način procijenjena proširena mjerna nesigurnost predstavlja CMC laboratorija za specificirano mjerno područje sile.

II EKSPERIMENTALNI DIO

Mehanički laboratorij Metalurškog Instituta „Kemal Kapetanović“ posjeduje ispitne mašine za mjerenje sile - univerzalne hidraulične mašine za statička ispitivanja sa više mjernih područja, čime je omogućeno mjerenje sile u mjernom području od 800 *N* do 500 *kN* i opremu za provjeru pokazivanja vrijednosti sile - prenosne etalone sile u mjernom području od 50 *N* do 5000 *kN*. Kvalitet i mjerna područja raspoložive ispitne opreme i opreme za provjeru pokazivanja sile su dovoljna za potrebe tržišta Bosne i Hercegovine u smislu kalibracije ispitne opreme za pokazivanje sile i pružanja usluga mehaničkih ispitivanja.

U cilju osiguranja kvaliteta rezultata ispitivanja Mehanički laboratorij redovno rekalibriše univerzalne hidraulične mašine za statička ispitivanja sa prenosnim etalonima sile koji se rekalibrišu u nacionalnim ili akreditovanim laboratorijama van granica Bosne i Hercegovine. Bosna i Hercegovina nema akreditovanu nacionalnu laboratoriju za silu. 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. Naravno, svaka kalibraciona laboratorija ima mogućnost akreditacije za pružanje usluga kalibracije prenosnih etalona za silu, ako ispoštuje zahtjeve relevantnih standarda [39].

Da bi se ispunili ovi zahtjevi, pored ostalog, kalibraciona laboratorija treba da posjeduje referentni etalon odgovarajućeg mjernog područja, da ima sposobnost poštivanja zahtjeva standarda koji se odnose na kalibraciju prenosnih etalona sile i garanciju sljedljivosti do nacionalnog etalona za silu - PTB Njemačka, te da ima definisanu proceduru za procjenu mjerne nesigurnosti i izraženu kalibracionu mjernu mogućnost - *CMC* laboratorija.

5 PLAN EKSPERIMENTALNOG RADA

Plan eksperimentalnog rada sastojao se u sljedećem:

1. Kalibrisati prenosne etalone sile *MGCplus-Z4/200 kN* i *MGCplus-Z4/500 kN*,
2. Procijeniti relativne greške i izvršiti izbor optimalnog stepena polinoma,
3. Procijeniti kriterije za ocjenjivanje prenosnog etalona,
4. Kvantificirati pojedinačne doprinose mjernoj nesigurnosti,
5. Procijeniti kombinovanu i proširenu mjernu nesigurnost,
6. Dokazati mogućnost korištenja prenosnog etalona, koji je kalibrisan u jednom mjernom području za kalibraciju ispitnih uređaja i u području pritiska i u području zatezanja,
7. Odrediti *CMC* laboratorija u mjernom području od 20 *kN* do 500 *kN*.

5.1 Kalibracija prenosnih etalona sile *MGCplus-Z4/200 kN* i *MGCplus-Z4/500 kN*

Prenosni etalon sile sastoji se od sljedećih komponenti:

- mjerne ćelije za silu određenog mjernog područja,
- pojačivačkog sistema *MGC plus* sa uređajem za očitavanje,
- kabla kojim se ostvaruje fizička veza između mjerne ćelije i pojačivačkog sistema.

Na slici II-1. su prikazane mjerne ćelije od 200 kN i 500 kN, a u tabeli II-1. je dat pregled njihovih tehničkih karakteristika.



a) Mjerna ćelija od 200 kN



b) Mjerna ćelija od 500 kN

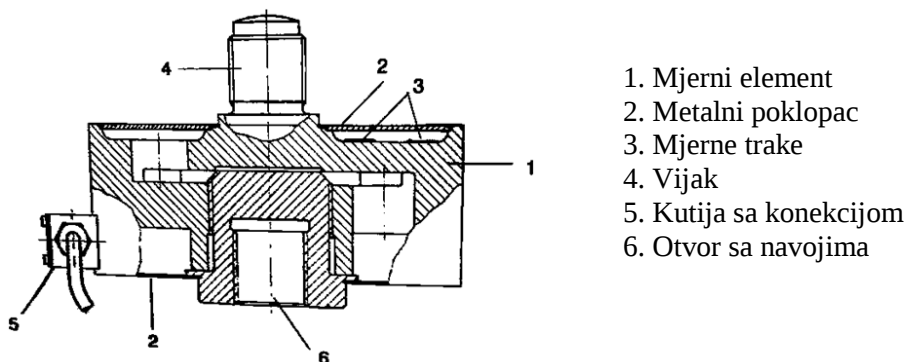
Slika II-1. Mjerne ćelije za silu

Tabela II-1. Tehničke karakteristike mjernih ćelija za silu od 200 kN i 500 kN

	Mjerna ćelija od 200 kN	Mjerna ćelija od 500 kN
Proizvođač	HBM, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Njemačka	
Serijski broj	031430032	030730111
Tip	Z4	
Godina proizvodnje	2000.	
Masa	11,2 kg	42 kg
Mjerno područje	0 kN do 200 kN	0 do 500 kN
Nazivna sila	200 kN	500 kN
Nula signal	-0,00189 mV/V	0,00371 mV/V
Smjer opterećenja	Pritisak, zatezanje	
Nominalna osjetljivost	2 N	
Tolerancija osjetljivosti	0,1 % od nominalnog područja	
Relativna razlika u preciznosti kod opterećenja na pritisak i zatezanje	0,2 % od nominalnog područja	
Relativno odstupanje od nulae	0,5	
Razlike kod pozicija montiranja	0,03 % od nominalnog područja	
Histereza	0,1 % od nominalnog područja	0,2 % od nominalnog područja
Linearno odstupanje	0,02 % od nominalnog područja	
Uticaj temperature na nula signal u nominalnom temperaturnom području	0,015 % od nominalnog područja	
Nominalno temperaturno područje	+10 do +40°C	
Uticaj ekscentričnosti po mm	0,005 % od nominalnog područja	
Referentna temperatura	+23°C	
Prva kalibracija	PTB Njemačka	

Mjerne ćelije su na vrhu i dnu zaštićene metalnim poklopcem koji štiti mjerni element od oštećenja, korozije i nečistoće. Sa gornje strane je integrisan vijak, a sa donje otvor sa

odgovarajućim navojem prilagođen pristrojima za kalibraciju prenosnog etalona i kalibraciju uređaja za zadavanje sile u području zatezanja, slika II-2. [40].



Slika II-2. Kućište mjerne ćelije za silu

Mjerni elementi mjernih ćelija sastoje se od osam mjernih traka povezanih u Wheatstonov most, koje su raspoređene na način da su četiri mjerne trake podvrgnute pozitivnoj a četiri negativnoj deformaciji kada je sistem opterećen. Mjerne trake se primjenom sile na tijelo mjerne ćelije elastično deformišu. Promjena u otporu mjernih traka proporcionalna je njihovoj promjeni u dužini i svaka promjena otpora rezultira promjenom napona u mostu i iskazuje se u jedinici mV/V . Budući da je promjena otpora proporcionalna promjeni sile, a promjena napona proporcionalna promjeni otpora slijedi da je promjena napona proporcionalna promjeni sile. Kada je mjerna ćelija povezana sa pojačalom kod djelovanja sile pritiska na displeju pojačala bit će pozitivan signal a kod djelovanja sile zatezanja negativan signal. Greške mjerenja od kabla za konekciju i promjene otpora zbog varijacije u temperaturi se kompenzuju 6-žilnim kablom i 7-polnom tehnikom spajanja.

Pojačivački sistem MGCplus služi kao oprema sa kojom mjerne ćelije obavljaju svoju funkciju. Na slici II-3. je prikazan MGCplus i date su njegove osnovne karakteristike.



Proizvođač: HBM-Hottinger Baldwin Messtechnik
Serijski broj: 864441
Tip: MGCplus AB 22 A ML30
Godina proizvodnje: 2000.
Mjerno područje: 0-2,5000 mV/V
Napon napajanja: 5 V
Rezolucija: 0,00001 mV/V

Slika II-3. Pojačivački sistem MGCplus

Podaci o konekcionim kablovima mjernih ćelija dati su u tabeli II-2.

Tabela II-2. Podaci o konekcionim kablovima

Mjerna ćelija	Dužina kabla	Izvedba	Tehnika spajanja
Z4/200 kN	5,85 m	6-žilni	7-polna
Z4/500 kN	5,90 m		

Kalibracija prenosnih etalona MGCplus-Z4/200 kN i MGCplus-Z4/500 kN realizovana je na GTM referentnoj mašini Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje, slika II-4. Referentna mašina ima mjerni sistem komparatornog tipa, tj. pretvara deformaciju u mjernoj ćeliji u izlazni električni signal i očekivanu

kalibracionu mjernu mogućnost od 0,05 % što je osigurano modelom dvostruko složenih visoko preciznih mjernih ćelija, slika II-5.



Slika II-4. GTM referentna mašina



Slika II-5. Dvostruko složene mjerne ćelije

Karakteristike referentne mašine date su u tabeli II-3.

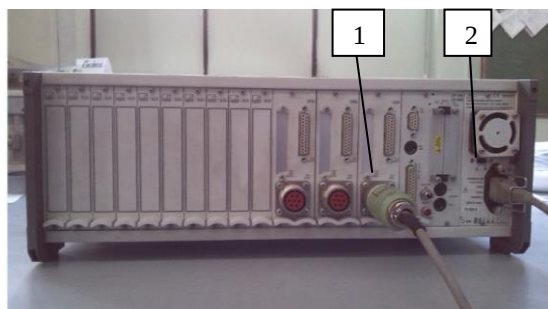
Tabela II-3. Karakteristike referentne mašine

Proizvođač	GTM, Gassmann Theiss Messtechnik, Njemačka
Serijski broj	163/K-BNME 500 Kn
Godina proizvodnje	2005.
Mjerno područje	(45 bar do 340 bar) 10 kN do 500 kN
Nazivna sila	500 kN
Način opterećenja	Hidraulički
Smjer opterećenja	Pritisak, zatezanje
Ponovljivost	1×10^{-4}
Kalibraciona mjerna mogućnost	0,05 %
Mjerni sistem	Mjerno pojačalo, dvostruko složene visoko precizne mjerne ćelije
Mjerna sljedljivost	DKD-K-35602 sa posredničkim etalonima: 12532 PTB 11/datum kalibracije: 04.10.2011. 12530 PTB 11/datum kalibracije: 04.10.2011. 12535 PTB 11/datum kalibracije: 06.10.2011.

5.1.1 Procedura pripreme prenosnog etalona za kalibraciju

Procedura pripreme prenosnog etalona za kalibraciju, slika II-6. sastojala se u slijedećem:

1. Ostvarena je konekcija mjerne ćelije preko konekcionog kabla sa pojačivačkim sistemom na kanalu 1,
2. Pojačivački sistem je preko odgovarajućeg konekcionog kabla spojen na dovod električne energije (220 V),



Slika II-6. Priprema prenosnog etalona za kalibraciju

3. Preko sistema za podešavanje uneseno je nominalno mjerno područje mjerne ćelije, izabrano pokazivanje izlaznog signala u jedinici mV/V i zabilježeno početno pokazivanje signala.

5.1.2 Procedura kalibracije prenosnog etalona za silu

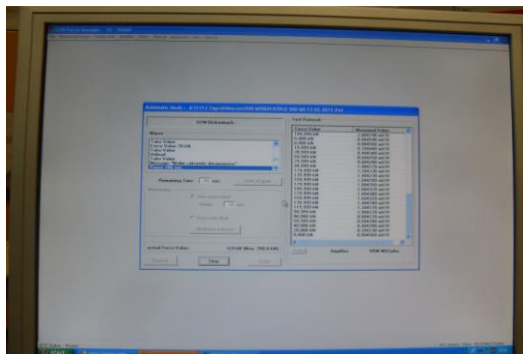
Nakon pripreme prenosnog etalona za kalibraciju realizovano je pozicioniranje mjerne ćelije u referentnu mašinu, slika II-7. i podešavanje softvera sa aspekta mjernog područja mjerne ćelije, izbora kalibracionih tačaka i područja kalibracije – pritisak, odnosno zatezanje.

Kalibracija je provedena u skladu sa standardom BAS EN ISO 376:2005, kako je opisano u tački 2.1. Kalibracija se realizovala opterećenjem mjerne ćelije do nominalne sile u zahtjevanom smjeru. Procedura je ponovljena tri puta. Bilježene su vrijednosti kod mjernih serija pri rastućoj sili i vrijednosti mjernih serija pri opadajućoj sili. Nakon mjernih serija, kod pozicije 0^0 mjerne ćelije u referentnoj mašini, mjerna ćelija je dislocirana sa referentne mašine, zarotirana za 120^0 , ponovo pozicionirana u referentnu mašinu te su očitane vrijednosti mjernih serija kod rastuće i opadajuće sile. Zatim je mjerna ćelija ponovo dislocirana, zarotirana za 240^0 , ponovo pozicionirana i očitane su vrijednosti mjernih serija kod rastuće i opadajuće sile. Vrijednosti su očitavane u deset kalibracionih tačaka ravnomjerno raspoređene u mjernom području kalibracije mjerne ćelije.

Izlazne vrijednosti signala mV/V za izabrane kalibracione tačke za rastuće i opadajuće vrijednosti sile automatski bilježi softver GTM Force Manager, slika II-8.



Slika II-7. Pozicionirana mjerna ćelija u referentnoj mašini



Slika II-8. GTM Force manager

Kod pozicioniranja mjernih ćelija u referentnu mašinu korišteni su pribor, slika II-9. prema zahtjevima standarda BAS EN ISO 376:2005.



- četiri posredna prstena,
- dvije kuglične navrtke,
- dva kuglična nosača,
- dvije ekstenzije,
- jedna pritisna ploča.

Slika II-9. Pristroji kod pozicioniranja mjernih ćelija u referentnu mašinu

5.1.2.1 Kalibracija prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Prenosni etalon MGCplus-Z4/200 kN kalibrisan je u 10 kalibracionih tačaka ravnomjerno raspoređenih po mjernom području mjerne ćelije od 10 % do 100 % nominalne sile. Kalibracija je realizovana u području pritiska i području zatezanja.

Prije startanja kalibracije mjerna ćelija se predopteretila tri puta u poziciji 0^0 i po jedanput u poziciji 120^0 i 240^0 .

Vrijednosti signala kod nominalne sile u svim pozicijama prenosnog etalona, vrijednosti signala nakon rasterećenja i procijenjeno relativno odstupanje nula vrijednosti prema izrazu 2-6. kod predopterećenja date su u tabeli II-4.

Tabela II-4. Izmjerene vrijednosti signala i relativno odstupanje nula vrijednosti kod predopterećenja, MGCplus-Z4/200 kN - područje pritiska

	0^0			120^0	240^0
	I	II	III		
Nula signal, mV/V	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Očitavanje kod nominalne vrijednosti, mV/V	2,00065	2,00070	2,00072	2,00068	2,00072
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,00006	0,00001	0,00004	0,00002	0,00004
Relativno odstupanje nula vrijednosti, %	0,003	0,000	0,002	0,001	0,002

Vrijednosti nula signala su praćene i u toku kalibracije u mjernim serijama kod povećanja sile i u mjernim serijama kod smanjenja sile. Izmjerene vrijednosti nula signala i relativno odstupanje nula vrijednosti dato je u tabeli II-5. Ove vrijednosti uzete su u obzir kod procjene relativne greške nule.

Tabela II-5. Izmjerene vrijednosti i relativna odstupanja nule kod mjernih serija, MGCplus-Z4/200 kN - područje pritiska

	X1	X2	X3/X4'	X5/X6'
Ostatak nakon rasterećenja, mV/V	0,00002	0,00002	0,00004	0,00003
Procjena relativnog odstupanja nula vrijednosti %	0,001	0,001	0,002	0,001

U tabeli II-6. su prikazani rezultati kalibracije prenosnog etalona. Za svaku mjernu seriju izmjerene su vrijednosti izlaznog signala u deset kalibracionih tačaka. Za mjerne serije kod pozicija rotacije mjerne ćelije bilježene su vrijednosti kod rasterećenja u cilju određivanja greške histereze.

Tabela II-6. Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Sila, kN	Pozicija etalona 0° mV/V		Pozicija etalona 120° mV/V		Pozicija etalona 240° 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	-

5.2 Procjena relativnih grešaka i izbor optimalnog stepena polinoma kod kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Na bazi rezultata kalibracije proračunate su srednje vrijednosti izlaznog signala za poziciju mjerne ćelije 0° i srednje vrijednosti izlaznog signala za pozicije mjerne ćelije 120° i 240° i vrijednosti relativnih odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prema jednačinama 2-1, 2-3 i 2-9, tabela II-7.

Tabela II-7. Relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

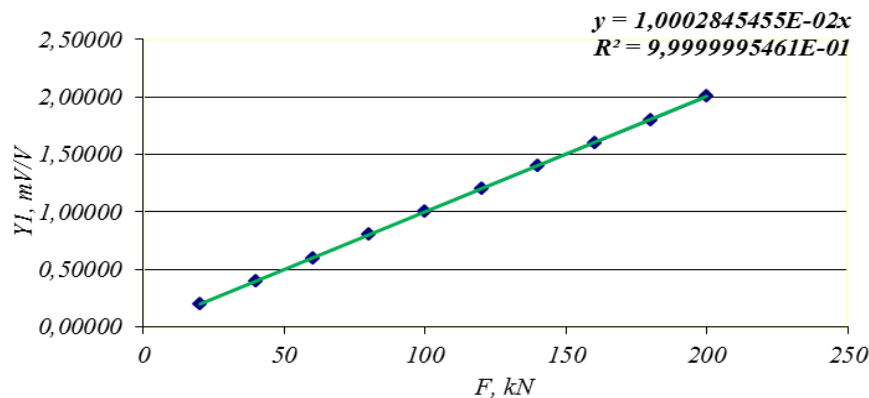
Sila kN	Pozicija etalona 0°		Pozicija etalona 120° i 240°		Pozicija etalona 120° i 240°
	$\bar{X}_{wr}$, mV/V	b' , %	$\bar{X}_r$, mV/V	b , %	v , %
0	-	-	-	-	-
20	0,20002	-0,010	0,20001	0,005	-0,072
40	0,40004	-0,007	0,40003	0,002	-0,026
60	0,60004	-0,008	0,60003	0,005	0,002
80	0,80007	-0,004	0,80007	0,004	0,011
100	1,00010	-0,003	1,00010	0,003	0,019
120	1,20027	-0,005	1,20026	0,005	0,014
140	1,40034	-0,006	1,40033	0,004	0,010
160	1,60050	-0,006	1,60050	0,006	0,006
180	1,80059	-0,005	1,80059	0,007	0,003
200	2,00076	-0,003	2,00077	0,006	-

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 kod mjernih serija sa povećanjem sile i izračunati su pripadajući koeficijenti. Na osnovu izračunatih koeficijenata jednačine proračunate su greške interpolacije za polinome različitih stepeni i izvršen izbor optimalnog stepena polinoma.

Najjednostavniji je polinom prvog stepena kod kojeg će odstupanje biti najveće, odnosno pravac, slika II-10., koji se još naziva i linearizacijom. Jednačina koja prikazuje rezultate kalibracije pravcem je:

$$Y1 = A \cdot X$$

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

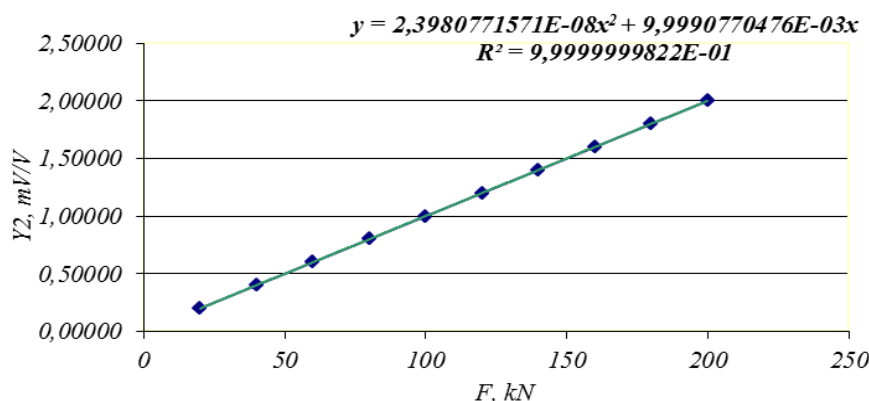


Slika II-10. Kriva kalibracije opisana polinomom prvog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Polinomom drugog stepena dobija se složenija jednačina kalibracije, slika II-11.

$$Y2 = A \cdot X^2 + B \cdot X$$

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

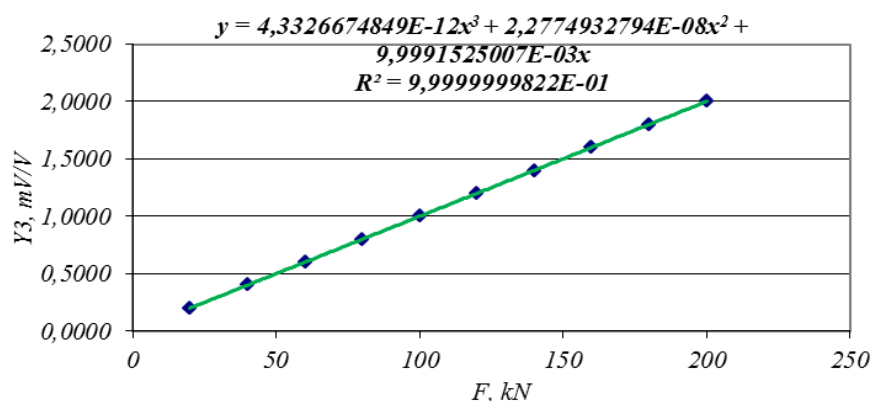


Slika II-11. Kriva kalibracije opisana polinomom drugog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena data je na slici II-12. i opisana je jednačinom:

$$Y3 = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X$$

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

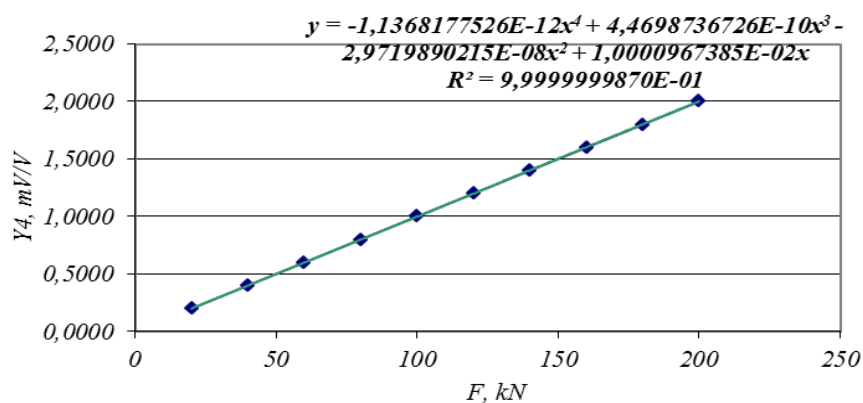


Slika II-12. Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Kriva kalibracije opisana polinomom četvrtog stepena, slika II-13. data je jednačinom:

$$Y4 = A \cdot X^4 + B \cdot X^3 + C \cdot X^2 + D \cdot X$$

$A = -1,1368177526E-12$; $B = 4,4698736726E-10$; $C = -2,9719890215E-08$; $D = 1,0000967385E-02$

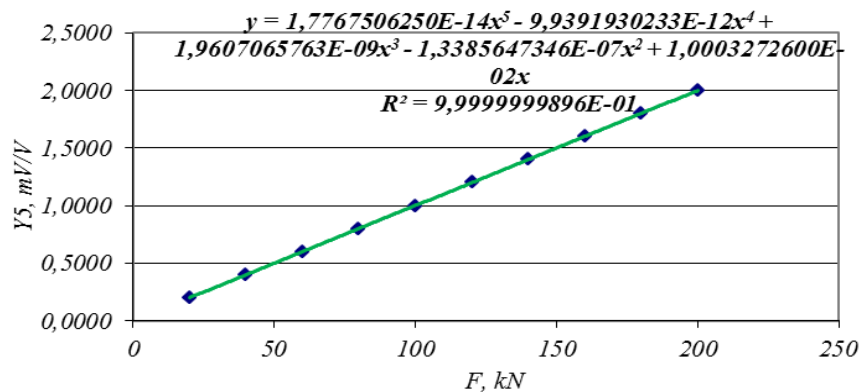


Slika II-13. Kriva kalibracije opisana polinomom četvrtog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Kriva kalibracije opisana polinomom petog stepena data je na slici II-14. i opisana je jednačinom:

$$Y5 = A \cdot X^5 + B \cdot X^4 + C \cdot X^3 + D \cdot X^2 + E \cdot X$$

$A = 1,7767506250E-14$; $B = -9,9391930233E-12$; $C = 1,9607065763E-09$; $D = -1,3385647346E-07$; $E = 1,0003272600E-02$



Slika II-14. Kriva kalibracije opisana polinomom petog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Iz dobijenih jednačina kalibracionih krivih izračunato je relativno interpolacijsko odstupanje za svaki stepen polinoma na temelju istih srednjih vrijednosti očitavanja mjernih serija kod povećanja sile. Zbog tumačenja procijenjenih vrijednosti i uočavanja razlika za polinome različitog stepena, interpolacijsko odstupanje je dato zaokruženo na pet decimalnih mjesta. Rezultati su dati u tabeli II-8.

Tabela II-8. Relativno interpolacijsko odstupanje za polinome različitog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

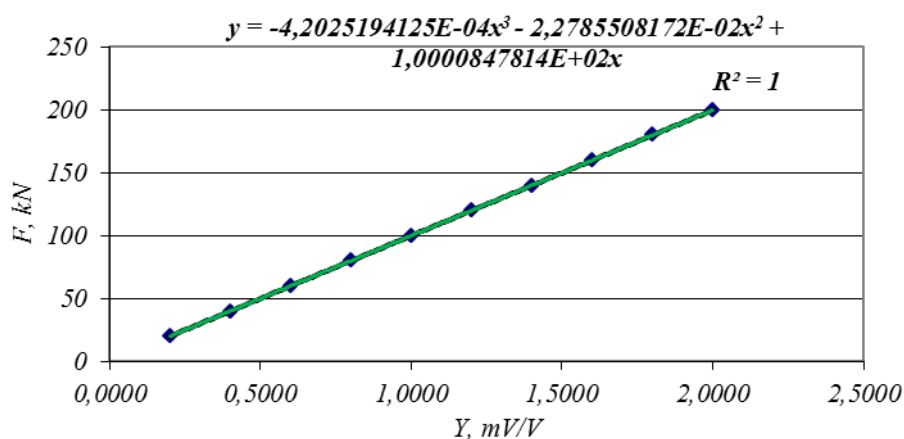
Sila kN	Xr mV/V	Relativno interpolacijsko odstupanje, %				
		f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	f_{c4}	f_{c5}
20	0,20001	-0,02678	0,01610	0,01057	0,00124	-0,00001
40	0,40003	-0,02678	0,01130	0,00596	0,00246	-0,00001
60	0,60003	-0,02845	0,00484	-0,00035	-0,00048	-0,00002
80	0,80007	-0,02511	0,00338	-0,00169	-0,00035	-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

Za dalja razmatranja korišten je polinom trećeg stepena.

Za proračun vrijednosti sile F na temelju vrijednosti očitavanja izlaznog signala X napravljena je inverzna jednačina interpolacije, slika II-15., u cilju dobijanja interpolirane vrijednosti za bilo koji iznos sile od 20 kN do 200 kN.

Inverzna jednačina interpolacije glasi:

$$F = -4,2025194125E-04 \cdot X^3 - 2,2785508172E-02 \cdot X^2 + 1,000084781E+02 \cdot X$$



Slika II-15. Inverzna kriva interpolacije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

U tabeli II-9. date su vrijednosti izlaznog signala na temelju provedene interpolacije polinomom trećeg stepena u mjernom području od 20 kN do 200 kN sa korakom od 2 kN prema interpolacionoj jednačini.

Tabela II-9. Interpolirane vrijednosti prema interpolacionoj jednačini, MGCplus-Z4/200 kN-područje pritiska

Sila kN	0 kN	2 kN	4 kN	6 kN	8 kN
	mV/V				
20	0,19999	0,21999	0,23999	0,25999	0,27999
30	0,30000	0,32000	0,34000	0,36000	0,38000
40	0,40000	0,42000	0,44001	0,46001	0,48001
50	0,50002	0,52002	0,54002	0,56002	0,58003
60	0,60003	0,62004	0,64004	0,66004	0,68005
70	0,70005	0,72006	0,74006	0,76007	0,78007
80	0,80008	0,82009	0,84009	0,86010	0,88010
90	0,90011	0,92012	0,94013	0,96013	0,98014
100	1,00015	1,02016	1,04016	1,06017	1,08018
110	1,10019	1,12020	1,14021	1,16021	1,18022
120	1,20023	1,22024	1,24025	1,26026	1,28027
130	1,30028	1,32029	1,34031	1,36032	1,38033
140	1,40034	1,42035	1,44036	1,46038	1,48039
150	1,50040	1,52041	1,54043	1,56044	1,58045
160	1,60047	1,62048	1,64049	1,66051	1,68052
170	1,70054	1,72055	1,74056	1,76058	1,78060
180	1,80061	1,82063	1,84064	1,86066	1,88067
190	1,90069	1,92071	1,94072	1,96074	1,98076
200	2,00078	2,02079	2,04081	2,06083	2,08085

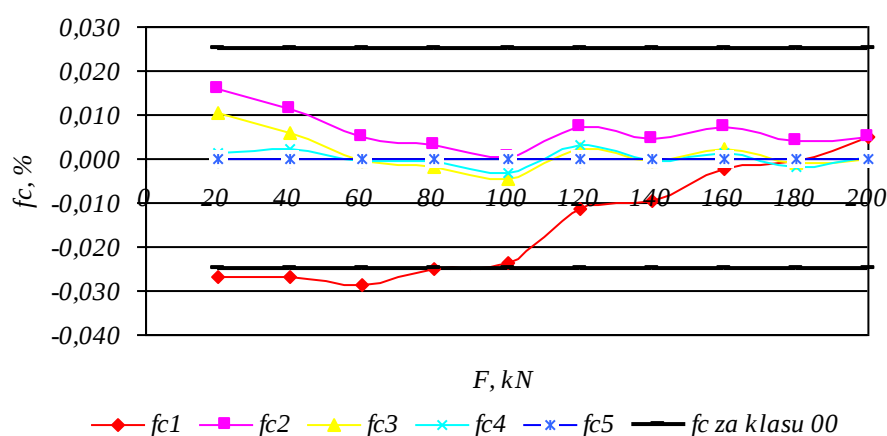
5.2.1 Interpretacija rezultata

Budući da standard BAS EN ISO 376:2005 za klasifikaciju prenosnog etalona definiše interpolacijsko odstupanje zaokruženo na tri decimalna mjesta, u tabeli II-10., date su vrijednosti interpolacijskog odstupanja zaokružene na tri decimalna mjesta.

Grafički prikaz vrijednosti relativnog interpolacijskog odstupanja za polinome različitog stepena za svaku kalibracionu tačku dat je na slici II-16. Takođe, na slici su date i granične vrijednosti interpolacijskog odstupanja definisane standardom BAS EN ISO 376:2005 za klasu 00 prenosnog etalona. Sa slike se vidi da je interpolacijsko odstupanje veće što je odgovarajuća sila manja. Kod manjih vrijednosti sile znatna je razlika interpolacijskog odstupanja kod različitog stepena polinoma. Polinom prvog stepena nije dovoljan za interpolaciju kod manjih sila zbog velikog interpolacijskog odstupanja koje prelazi graničnu vrijednost od $\pm 0,025\%$, za klasu 00 prenosnog etalona. Polinom drugog stepena takođe nije prihvatljiv jer se približava graničnoj vrijednosti kod manjih sila. Razlike interpolacijskog odstupanja kod polinoma trećeg, četvrtog i petog stepena nisu velike čak ni kod manjih vrijednosti sila pa se sa sigurnošću može prihvatiti polinom trećeg stepena za proračun interpolacijskog odstupanja.

Tabela II-10. Relativno interpolacijsko odstupanje (zaokružene vrijednosti na tri decimalna mjesta) za polinome različitog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Sila kN	X_r mV/V	Relativno interpolacijsko odstupanje, %				
		f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	f_{c4}	f_{c5}
20	0,20001	-0,027	0,016	0,011	0,001	0,000
40	0,40003	-0,027	0,011	0,006	0,002	0,000
60	0,60003	-0,028	0,005	0,000	0,000	0,000
80	0,80007	-0,025	0,003	-0,002	0,000	0,000
100	1,00010	-0,023	0,000	-0,005	-0,003	0,000
120	1,20026	-0,012	0,007	0,002	0,003	0,000
140	1,40033	-0,010	0,004	0,000	-0,001	0,000
160	1,60050	-0,002	0,007	0,002	0,001	0,000
180	1,80059	0,000	0,004	-0,001	-0,002	0,000
200	2,00077	0,005	0,005	0,000	0,001	0,000



Slika II-16. Relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

5.3 Procjena kriterija za ocjenjivanje prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN - kalibracija u području pritiska

Iz rezultata kalibracije prenosnog etalona procijenjeni su kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona prema zahtjevima standarda BAS EN ISO 376:2005.

U tabeli II-11. dati su procijenjeni kriteriji za klasifikaciju, odnosno procijenjena relativna odstupanja po kalibracionim tačkama:

- relativno odstupanje ponovljivosti izračunato prema jednačini 2-1.,
- relativno odstupanje obnovljivosti izračunato prema jednačini 2-3.,
- relativno odstupanje interpolacije izračunato prema jednačini 2-5.,
- relativno odstupanje nule izračunato prema jednačini 2-6.,
- relativno odstupanje histereze izračunato prema jednačini 2-9.

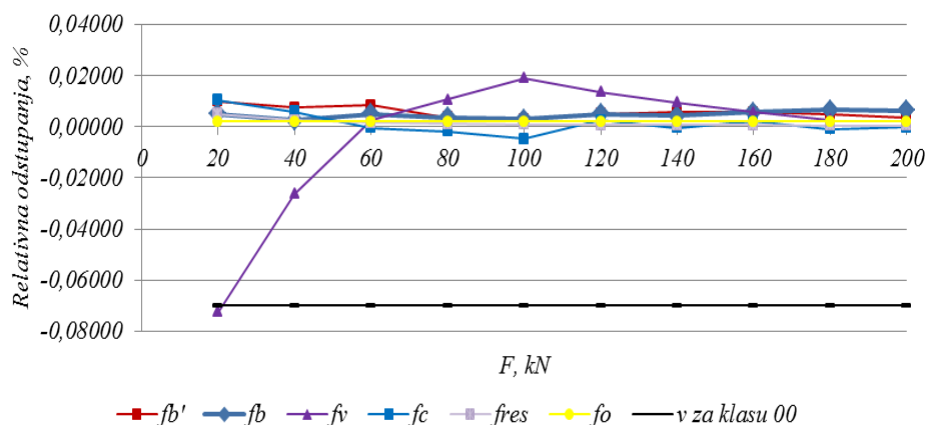
Na bazi vrijednosti procijenjenih odstupanja etalon je klasificiran prema standardu BAS EN ISO 376:2005.

Tabela II-11. Procijenjeni kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN-područje pritiska

Sila kN	Relativna odstupanja, %					Klasa
	Ponovljivosti b'	Obnovljivosti b	Interpolacije f_c	Nule f_o	Histereze ν	
20	-0,010	0,005	0,011	0,002	-0,072	05
40	-0,007	0,002	0,006		-0,026	00
60	-0,008	0,005	0,000		0,002	00
80	-0,004	0,004	-0,002		0,011	00
100	-0,003	0,003	-0,005		0,019	00
120	-0,005	0,005	0,002		0,014	00
140	-0,006	0,004	0,000		0,010	00
160	-0,006	0,006	0,002		0,006	00
180	-0,005	0,007	-0,001		0,003	00
200	-0,003	0,006	0,000		-	00

5.3.1 Interpretacija rezultata

Procijenjena relativna odstupanja u zavisnosti od vrijednosti sile data su na slici II-17.



Slika II-17. Relativna odstupanja u zavisnosti od sile,
MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Sve vrijednosti relativnih odstupanja nalaze se u granicama za klasu 00 prenosnog etalona u mjernom području od 40 kN do 200 kN. Vrijednost relativnog odstupanje histereze se povećava sa smanjenjem vrijednosti sile i za kalibracionu tačku 20 kN prelazi vrijednost za klasu 00 za 0,002 % , odnosno za ovu vrijednost sile prenosni etalon se može, sa aspekta rezultata kalibracije, klasificirati u klasu 05.

Standard BAS EN ISO 376:2005 za kriterij klasifikacije prenosnog etalona definiše i standardnu mjernu nesigurnost referentnog etalona, odnosno referentne mašine na kojoj je kalibrisan prenosni etalon.

Budući da se kalibracija prenosnog etalona realizovala na referentnoj mašini sa hidrauličkim načinom opterećenja i sa dvostruko složenim mjernim ćelijama koje se kalibrišu posredničkim etalonima preciznosti tipa Z4A, što znači da je osigurana indirektna

sljedljivost do nacionalnog etalona, pri čemu je kod kalibracije referentnog etalona uzeta u obzir mjerna nesigurnost i posredničkih etalona i dvostruko složenih mjernih ćelija, osigurana je najbolja proširena mjerna nesigurnost od 0,05% što prema zahtjevima standarda BAS EN ISO 376:2005 može zadovoljiti najviše klasu 1 za prenosni etalon sile. Shodno tome, kada se uzme u obzir i ovaj kriterij prenosni etalon MGCplus-Z4/200 kN se klasificira u klasu 1.

Ako bi se kalibracija prenosnog etalona realizovala na referentnom etalonu koji ostvaruje direktnu sljedljivost do nacionalnog etalona za silu PTB Njemačka i koji bi mogao imati bolju proširenu nesigurnost, $\leq 0,01\%$ što je dovoljno za klasu 00, prenosni etalon bi se, obzirom na sve ostale kriterije klasifikacije, koji zavise od ponašanja prenosnog etalona u toku kalibracije, mogao klasificirati u klasu 00 za mjerno područje od 40 kN do 200 kN, odnosno u klasu 05 za kalibracionu tačku 20 kN.

Sa prenosnim etalonima klase 1 Mehanički kalibracioni laboratorij Instituta može odgovoriti zahtjevima tržišta Bosne i Hercegovine kod kalibracija ispitnih uređaja za zadavanje sile u skladu sa standardom BAS EN ISO 7500-1:2004 i dati najviše klasu 1 ispitnoj mašini što zadovoljava zahtjeve ispitne metode vezano za klasu ispitne mašine.

5.4 Kvantifikacija standardnih doprinosa mjernoj nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN - područje pritiska

Kod procjene nesigurnosti prenosnog etalona uzeti su u obzir slijedeći doprinosi:

1. Doprinosi nesigurnosti koji se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije i karakteristika prenosnog etalona,
2. Doprinosi nesigurnosti od referentnog etalona, odnosno referentne mašine.

Nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije prenosnog etalona i njegovih karakteristika su:

- nesigurnost relativnog odstupanja nula signala, u_{f0} ,
- nesigurnost relativnog odstupanja rezolucije uređaja za očitavanje, u_{res} ,
- nesigurnost relativnog odstupanja ponovljivosti rezultata kalibracije, u_b ,
- nesigurnost relativnog odstupanja obnovljivosti rezultata kalibracije, u_b ,
- nesigurnost relativnog odstupanja histereze, u_v ,
- nesigurnost relativnog odstupanja interpolacije, u_{fc} .

Nesigurnost relativnog odstupanja nula signala, u_{f0}

Relativno odstupanje nula signala predstavlja apsolutnu razliku između očitavanja nule prije početka nanošenja opterećenja i nakon rasterećenja za svaku mjernu seriju, s tim da se za procjenu uzima zabilježeno maksimalno odstupanje u odnosu na očitavanje izlaznog signala kod maksimalne sile.

Maksimalni ostatak nakon rasterećenja zabilježen je na mjernoj seriji sa rastućim opterećenjem kod pozicije od 120° mjerne ćelije u referentnoj mašini u iznosu od 0,00004 mV/V, a zabilježeno očitavanje nula signala prije nanošenja opterećenja je 0,00000 mV/V, pa je relativno odstupanje nula signala:

$$f_o = \left(\frac{0,00000 - 0,00004}{2,00077} \right) \cdot 100 = 0,00200\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja nula signala temelji se na pravougaonoj raspodjeli i procijenjena prema izrazu 2-14. iznosi:

$$u_{f_0} = \frac{0,00200}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00058\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja rezolucije uređaja za očitavanje, u_{res}

Očitavanje izlaznog signala realizovano je na uređaju za očitavanje pojačivačkog sistema MGCplus sa digitalnom skalom i najmanjom promjenom vrijednosti izlaznog signala, od 0,00001 mV/V što predstavlja njegovu rezoluciju. Relativna rezolucija izračunata je iz rezolucije *r/izlazni signal* za svaku kalibracionu tačku. Za prvu kalibracionu tačku relativno odstupanje rezolucije iznosi:

$$f_{res} = \left(\frac{0,00001}{2,00077} \right) \cdot 100 = 0,00500\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja rezolucije uređaja za očitavanje temelji se na pravougaonoj raspodjeli i procijenjena je prema izrazu 2-12., i za prvu kalibracionu tačku iznosi:

$$u_{fres} = \frac{0,00500}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00144\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja ponovljivosti rezultata kalibracije, $u_{b'}$

Relativno odstupanje ponovljivosti izračunato je iz apsolutne razlike očitavanja izlaznog signala kod mjernih serija pri rastućoj sili kod 0⁰ pozicije mjerne ćelije u referentnoj mašini, u odnosu na njihovu srednju vrijednost za svaku kalibracionu tačku. Za prvu kalibracionu tačku relativno odstupanje ponovljivosti iznosi:

$$b' = \frac{0,20003 - 0,20001}{0,20002} \cdot 100 = 0,01000\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja ponovljivosti rezultata kalibracije temelji se na pravougaonoj raspodjeli i procijenjena je prema izrazu 2-11. Za prvu kalibracionu tačku iznosi:

$$u_{b'} = \frac{0,01000}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00289\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja obnovljivosti rezultata kalibracije, u_b

Relativno odstupanje obnovljivosti rezultata kalibracije izračunato je iz očitavanja izlaznog signala kod različitih ugradbenih položaja mjerne ćelije u referentnoj mašini pri rastućim silama u odnosu na njihovu srednju vrijednost. Za prvu kalibracionu tačku iznosi:

$$b = \frac{0,20002 - 0,20001}{0,20001} \cdot 100 = 0,00500\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja obnovljivosti je standardno odstupanje ocijenjene vrijednosti srednje greške i procijenjena je prema izrazu 2-10. Za prvu kalibracionu tačku iznosi:

$$u_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{100}{0,20001} \cdot \sqrt{\frac{1}{3-1} \cdot (0,20001 - 0,20001)^2 + (0,20001 - 0,20001)^2 + (0,20002 - 0,20001)^2} \right) \%$$

$$u_b = 0,00255\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja histereze, u_v

Relativno odstupanje histereze izračunato je iz očitavanja izlaznog signala kod mjernih serija sa različitim ugradbenim položajem mjerne ćelije u referentnoj mašini, pozicije 120° i 240° , pri rastućim i opadajućim silama za svaku kalibracionu tačku. Za prvu kalibracionu tačku iznosi:

$$v = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{0,19988 - 0,20001}{0,20001} \right) \cdot 100 \right] + \left[\left(\frac{0,19986 - 0,20002}{0,20002} \right) \cdot 100 \right] = -0,07249\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja histereze temelji se na pravougaonoj raspodjeli i procijenjena je prema izrazu 2-13. Za prvu kalibracionu tačku iznosi:

$$u_v = \frac{-0,07249}{2 \cdot \sqrt{3}} = -0,02093\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja interpolacije, u_{fc}

Kod opterećivanja mjerne ćelije postepeno se deformišu mjerne trake mijenjajući otpor deformaciji. Kao rezultat ovakve promjene je kriva sila-izlazni signal, koja se postepeno ujednačeno mijenja kroz cijelo mjerno područje prenosnog etalona. Veza između primijenjene sile i deformacije mjernih traka nije linearna, ali je stabilna karakteristika mjernih traka. Ova nelinearnost se javlja kao posljedica nesavršenosti mjernog sistema za pokazivanje sile, npr. zbog naponske nestabilnosti ili nestabilnosti u sistemu mjerne ćelije i slično.

Iz rezultata kalibracije dobivena je jednačina kalibracije koja predstavlja matematičku vezu između izlaznog signala i primijenjene sile. Ova jednačina opisuje rezultate kalibracije. Metodom najmanjih kvadrata dobijen je polinom koji kompenzira nepotpunu linearnost i omogućava da se ove nelinearnosti javljaju kao odstupanja. Procjena standardne nesigurnosti sačinjena je od širine pojasa ovih odstupanja oko osnovne krive kalibracije, odnosno procjene granice greške usljed rada prenosnog etalona kada se sile izračunavaju preko jednačine kalibracije.

Kako je pokazano u tački 5.3, polinom trećeg stepena je sasvim dovoljan za procjenu relativnog odstupanja interpolacije. Polinomi četvrtog i petog stepena imaju smisla kod kalibracije prenosnih etalona sa uređajem za pokazivanje izlaznog signala sa rezolucijom od 2×10^{-5} pri maksimalnom opterećenju. Korištenjem interpolacione jednačine može se interpolirati svaka tačka sile u mjernom području prenosnog etalona [35].

Relativno odstupanje interpolacije rezultata kalibracije izračunato je iz razlike srednje vrijednosti očitavanja izlaznog signala kod mjernih serija kod različitih ugradbenih položaja mjerne ćelije pri rastućim silama i interpolirane vrijednosti dobivene iz interpolacione jednačine u odnosu na interpoliranu vrijednost i za prvu kalibracionu tačku iznosi:

$$f_c = \frac{\left[\left(\frac{0,20001 + 0,20001 + 0,20002}{3} \right) - (4,33266748490^{-12} \cdot 20^3) + (2,27749327940^{-8} \cdot 20^2) + (9,99915250070^{-3} \cdot 20) \right]}{\left[(4,33266748490^{-12} \cdot 20^3) + (2,27749327940^{-8} \cdot 20^2) + (9,99915250070^{-3} \cdot 20) \right]} \cdot 100$$

$$f_c = 0,01057\%$$

Nesigurnost relativnog odstupanja interpolacije temelji se na trougaonoj raspodjeli i procijenjena je prema izrazu 2-16. Za prvu kalibracionu tačku iznosi:

$$u_{fc} = \frac{0,01057}{2 \cdot \sqrt{6}} = 0,00216\%$$

Za procjenu relativnih odstupanja i odgovarajućih nesigurnosti ostalih kalibracionih tačaka provedena je ista procedura.

Procjena standardne kombinovane nesigurnosti koja se može ocijeniti iz rezultata kalibracije prenosnog etalona jednaka je kvadratnom korijenu iz sume kvadrata standardnih nesigurnosti:

$$u_{cpet} = \sqrt{u_{fo}^2 + u_{res}^2 + u_{b'}^2 + u_b^2 + u_v^2 + u_{fc}^2}$$

Procijenjene vrijednosti standardnih nesigurnosti po kalibracionim tačkama i kombinovana standardna nesigurnost koja se može procijeniti iz rezultata kalibracije prenosnog etalona date su u tabeli II-12.

Tabela II-12. Standardne nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Sila, kN	Standardne nesigurnosti, %						u_{cpet} %
	u_{fo} %	u_{res} %	$u_{b'}$ %	u_b %	u_v %	u_{fc} %	
20	0,00058	0,00144	0,00289	0,00255	-0,02093	0,00216	0,021
40	0,00058	0,00072	0,00216	0,00152	-0,00758	0,00122	0,008
60	0,00058	0,00048	0,00241	0,00304	0,00072	-0,00007	0,004
80	0,00058	0,00036	0,00108	0,00197	0,00307	-0,00034	0,004
100	0,00058	0,00029	0,00087	0,00183	0,00548	-0,00097	0,006
120	0,00058	0,00024	0,00144	0,00246	0,00397	0,00050	0,005
140	0,00058	0,00021	0,00165	0,00225	0,00278	-0,00009	0,004
160	0,00058	0,00018	0,00162	0,00295	0,00162	0,00044	0,004
180	0,00058	0,00016	0,00144	0,00326	0,00080	-0,00020	0,004
200	0,00058	0,00014	0,00101	0,00318	-	-0,00003	0,003

Nesigurnost referentnog etalona

Nesigurnost referentnog etalona predstavlja kalibracionu mjernu mogućnost laboratorija i izražena je kao proširena nesigurnost sa normalnom raspodjelom (nivo povjerenja od 95 % i faktor prekrivanja $k=2$).

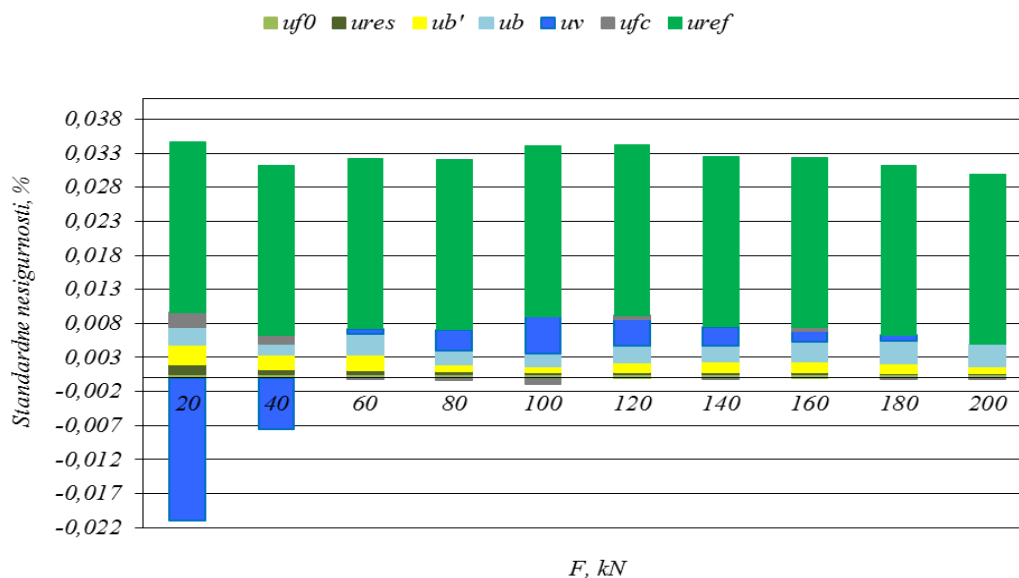
Proširena mjerna nesigurnost referentnog etalona GTM, na kojem je realizovana kalibracija prenosnog etalona je $U=0,05\%$.

Budući da se referentni etalon koristi za kalibraciju prenosnog etalona, njegova nesigurnost ima udjela u ukupnoj nesigurnosti prenosnog etalona. Standardna nesigurnost referentnog etalona određena je prema jednačini:

$$u_{ref} = \frac{U_{ref}}{k}, \%$$

5.4.1 Interpretacija rezultata

Vrijednosti standardnih nesigurnosti procijenjenih iz rezultata kalibracije prenosnog etalona i nesigurnost referentnog etalona, koje čine kombinovanu nesigurnost prenosnog etalona, u zavisnosti od primjenjene sile grafički su prikazani na slici II-18.



Slika II-18. Doprinos standardnih nesigurnosti u zavisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Sa slike se vidi da standardna nesigurnost referentnog etalona ima najveći doprinos kombinovanoj nesigurnosti prenosnog etalona. Najmanji doprinos kombinovanoj nesigurnosti procijenjen je od standardne nesigurnosti nulae i rezolucije sistema za očitavanje izlaznog signala na pojačivačkom sistemu MGCplus. Vrijednosti standardnih nesigurnosti prenosnog etalona procijenjene iz rezultata kalibracije pokazuju dobru stabilnost prenosnog etalona. Nešto veća vrijednost standardne nesigurnosti histereze (0,02093 %), na prvoj kalibracionoj tački ne može znatno doprinijeti povećanju vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti prenosnog etalona ako se uzme u obzir činjenica da je standardna nesigurnost referentnog etalona za svaki nivo sile veća od vrijednosti kombinovane nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona.

5.5 Procjena kombinovane i proširene mjerne nesigurnosti prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Kombinovana mjerna nesigurnost prenosnog etalona sastavljena je iz standardne kombinovane nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona i procijenjene nesigurnosti referentnog etalona:

$$u_c = \sqrt{u_{cpet}^2 + u_{ref}^2}, \%$$

Vrijednosti kombinovane mjerne nesigurnosti prenosnog etalona procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona u_{cpet} , standardna nesigurnost referentnog etalona u_{ref} i kombinovana nesigurnost prenosnog etalona u_c , za sve kalibracione tačke date su u tabeli II-13.

Tabela II-13. Vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} i u_c po kalibracionim tačkama, MGCplus-Z4/200 kN –područje pritiska

Sila, kN	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
u_{cpet} , %	0,021	0,008	0,004	0,004	0,006	0,005	0,004	0,004	0,004	0,003
u_{ref} , %	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
u_c , %	0,033	0,026	0,025	0,025	0,026	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025

Proširena mjerna nesigurnost, u skladu sa BAS EN ISO 376:2005 i EURAMET/cg-04:2011, procijenjena je prema izrazu:

$$U = k \cdot u_c, \%$$

Ova nesigurnost ne sadrži nikakav doprinos u pogledu dugoročne nestabilnosti prenosnog etalona. Izmjerene vrijednosti su u okviru datog intervala sa vjerovatnoćom od 95%.

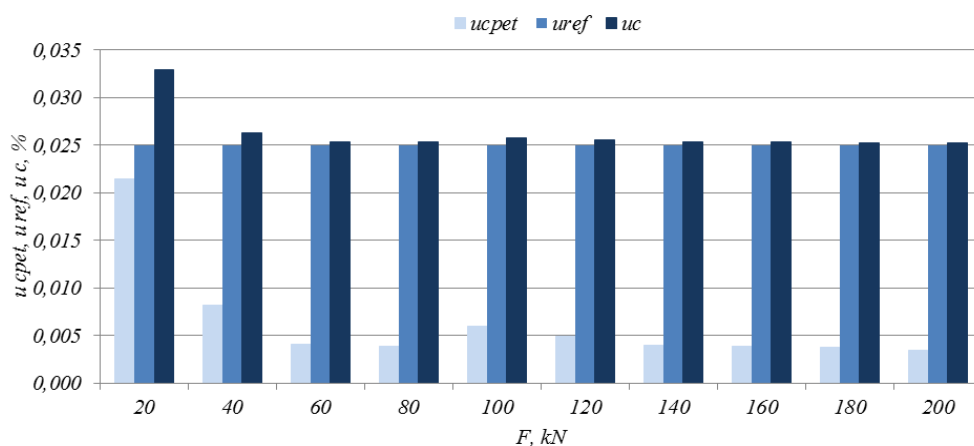
U tabeli II-14. data je klasifikacija etalona prema standardu BAS EN ISO 376:2005 i pripadajuća proširena nesigurnost po kalibracionim tačkama.

Tabela II-14. Klasifikacija etalona i pripadajuća proširena nesigurnost, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Sila, kN	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Klasa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U , %	0,066	0,053	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,050

5.5.1 Interpretacija rezultata

Grafički prikaz vrijednosti kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona u_{cpet} , standardne nesigurnosti referentnog etalona u_{ref} i kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona u_c za svaku primjenjenu silu dat je na slici II-19.



Slika II-19. Doprinos u_{ref} i u_{cpet} u kombinovanoj nesigurnosti u ovisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje pritiska

Sa slike se vidi da je najveći doprinos kombinovanoj nesigurnosti procijenjen od nesigurnosti referentnog etalona u iznosu od 0,025 %. Kombinovana nesigurnost prenosnog etalona ima najveću vrijednost u kalibracionoj tački 20 kN, koja je procijenjena, osim od nesigurnosti referentnog etalona, i od kombinovane nesigurnosti procijenjene iz

rezultata kalibracije prenosnog etalona (u iznosu od 0,021 %). Ova nesigurnost ima najveći doprinos od standardne nesigurnosti histereze i standardne nesigurnosti interpolacije ali je još uvijek u dozvoljenim granicama za klasu 00 prenosnog etalona.

5.6 Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN - područje zatezanja

Kod kalibracije prenosnog etalona u području zatezanja provedena je ista procedura kao kod kalibracije u području pritiska, s tim da je mjerna ćelija podvrgnuta zateznom opterećenju.

Vrijednosti signala kod nominalne sile u svim pozicijama prenosnog etalona, vrijednosti signala nakon rasterećenja i procijenjeno relativno odstupanje nula vrijednosti kod predopterećenja date su u tabeli II-15.

Tabela II-15. Izmjerene vrijednosti signala i relativno odstupanje nula vrijednosti kod predopterećenja, MGCplus-Z4/200 kN-područje zatezanja

	0^0			120^0	240^0
	I	II	III		
Nula signal, mV/V	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Očitavanje kod nominalne vrijednosti, mV/V	-2,00041	-1,99964	-1,99972	-1,99970	-1,99970
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,00021	-0,00005	-0,00006	-0,00010	-0,00008
Relativno odstupanje nula vrijednosti, %	0,010	0,003	0,003	0,005	0,004

U tabeli II-16. date su izmjerene vrijednosti nula signala nakon rasterećenja kod svih mjernih serija i relativno odstupanje nula vrijednosti.

Tabela II-16. Izmjerene vrijednosti nula signala i relativno odstupanje nule kod mjernih serija, MGCplus-Z4/200 kN-područje zatezanja

	X1	X2	X3/X4'	X5/X6'
Ostatak nakon rasterećenja, mV/V	-0,00006	-0,00006	-0,00006	-0,00006
Relativno odstupanje nula vrijednosti, %	0,003	0,003	0,003	0,003

U tabeli II-17. prikazani su rezultati kalibracije prenosnog etalona u području zatezanja

Tabela II-17. Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

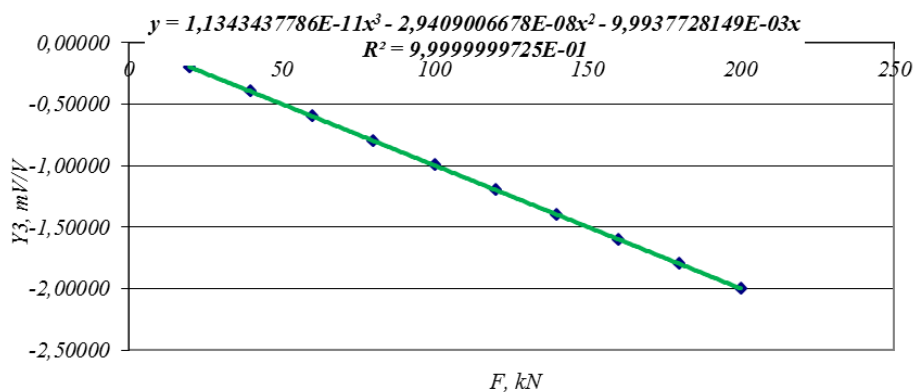
Sila kN	Pozicija etalona 0^0		Pozicija etalona 120^0		Pozicija etalona 240^0	
	$X1, \text{ mV/V}$	$X2, \text{ mV/V}$	$X3, \text{ mV/V}$	$X4', \text{ mV/V}$	$X5, \text{ mV/V}$	$X6', \text{ mV/V}$
0	-	-	-	-	-	-
20	-0,19991	-0,19994	-0,19995	-0,19973	-0,19993	-0,19967
40	-0,39978	-0,39982	-0,39985	-0,39970	-0,39981	-0,39966
60	-0,59969	-0,59974	-0,59976	-0,59971	-0,59973	-0,59967
80	-0,79963	-0,79968	-0,79971	-0,79962	-0,79969	-0,79959
100	-0,99959	-0,99964	-0,99968	-0,99963	-0,99964	-0,99960
120	-1,19957	-1,19958	-1,19964	-1,19968	-1,19962	-1,19967
140	-1,39966	-1,39965	-1,39974	-1,39975	-1,39971	-1,39976
160	-1,59970	-1,59971	-1,59979	-1,59983	-1,59980	-1,59985
180	-1,79970	-1,79968	-1,79976	-1,79981	-1,79978	-1,79979
200	-1,99979	-1,99977	-1,99983	-	-1,99987	-

Na bazi rezultata kalibracije proračunate su srednje vrijednosti izlaznog signala za poziciju mjerne ćelije 0^0 i srednja vrijednost izlaznog signala za pozicije mjerne ćelije 120^0 i 240^0 i procijenjena relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze. Vrijednosti su date u tabeli II-18.

Tabela II-18. Procijenjena relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

Sila kN	Pozicija etalona 0^0		Pozicija etalona 120^0 i 240^0		Pozicija etalona 120^0 i 240^0
	$\bar{X}_{wr}, \text{ mV/V}$	$b', \%$	$\bar{X}_r, \text{ mV/V}$	$b, \%$	$v, \%$
0	-	-	-	-	-
20	-0,19993	0,015	-0,19993	0,015	-0,1200
40	-0,39980	0,010	-0,39981	0,010	-0,0375
60	-0,59972	0,008	-0,59973	0,008	-0,0092
80	-0,79966	0,006	-0,79968	0,006	-0,0119
100	-0,99962	0,005	-0,99964	0,005	-0,0045
120	-1,19958	0,001	-1,19961	0,001	0,0038
140	-1,39966	-0,001	-1,39970	-0,001	0,0021
160	-1,59971	0,001	-1,59976	0,001	0,0028
180	-1,79969	-0,001	-1,79975	-0,001	0,0017
200	-1,99978	-0,001	-1,99983	-0,001	-

Na slici II-20. data je kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena.



Slika II-20. Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

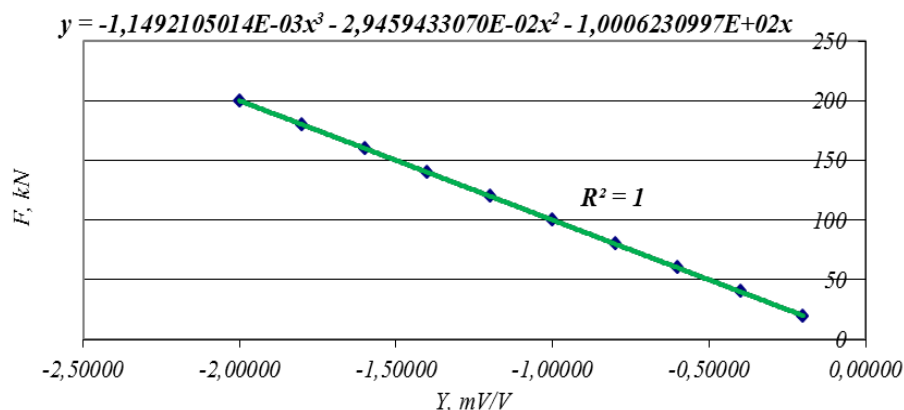
Jednačina interpolacije dobivena na temelju srednjih vrijednosti i izračunata pomoću metode najmanjih kvadrata polinomom trećeg stepena glasi:

$$Xa = 1,1343437786E-11 \cdot F^3 - 2,9409006678E-08 \cdot F^2 - 9,9937728149E-03 \cdot F$$

Za proračun vrijednosti sile F na temelju vrijednosti očitavanja X urađena je inverzna jednačina interpolacije, slika II-21., u cilju dobijanja interpolirane vrijednosti za bilo koji iznos sile od 20 kN do 200 kN.

Inverzna jednačina interpolacije data je jednačinom:

$$F = -1,1492105014E-03 \cdot X^3 - 2,9459433070E-02 \cdot X^2 - 1,0006230997E+02 \cdot X$$



Slika II-21. Prikaz rezultata kalibracije preko inverzne interpolacione jednačine, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

U tabeli II-19. provedena je interpolacija polinomom trećeg stepena u mjernom području od 20 kN do 200 kN sa korakom od 2 kN prema interpolacionoj jednačini.

Tabela II-19. Interpolirane vrijednosti, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

Sila, kN	0 kN	2 kN	4 kN	6 kN	8 kN
	mV/V				
20	-0,19989	-0,21988	-0,23987	-0,25986	-0,27985
30	-0,29984	-0,31983	-0,33982	-0,35981	-0,37981
40	-0,39980	-0,41979	-0,43978	-0,45977	-0,47977
50	-0,49976	-0,51975	-0,53975	-0,55974	-0,57974
60	-0,59973	-0,61972	-0,63972	-0,65971	-0,67971
70	-0,69970	-0,71970	-0,73970	-0,75969	-0,77969
80	-0,79968	-0,81968	-0,83968	-0,85967	-0,87967
90	-0,89967	-0,91967	-0,93967	-0,95966	-0,97966
100	-0,99966	-1,01966	-1,03966	-1,05966	-1,07966
110	-1,09966	-1,11966	-1,13966	-1,15966	-1,17966
120	-1,19966	-1,21966	-1,23966	-1,25966	-1,27966
130	-1,29966	-1,31966	-1,33967	-1,35967	-1,37967
140	-1,39967	-1,41968	-1,43968	-1,45968	-1,47969
150	-1,49969	-1,51969	-1,53970	-1,55970	-1,57971
160	-1,59971	-1,61971	-1,63972	-1,65972	-1,67973
170	-1,69974	-1,71974	-1,73975	-1,75975	-1,77976
180	-1,79977	-1,81977	-1,83978	-1,85979	-1,87979
190	-1,89980	-1,91981	-1,93982	-1,95982	-1,97983
200	-1,99984	-2,01985	-2,03986	-2,05987	-2,07988

U tabeli II-20. dati su procijenjeni kriteriji za klasifikaciju, odnosno relativna odstupanja za sve nivoe sile u području kalibracije.

Tabela II-20. Procijenjeni kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

Sila kN	Relativna odstupanja, %					Klasa
	Ponovljivosti b'	Obnovljivosti b	Interpolacije f_c	Nule f_o	Histereze v	
20	0,015	-0,020	0,021	0,003	-0,120	05
40	0,010	-0,018	0,004		-0,038	00
60	0,008	-0,012	-0,001		-0,009	00
80	0,006	-0,010	-0,001		-0,012	00
100	0,005	-0,009	-0,002		-0,005	00
120	0,001	-0,006	-0,004		0,004	00
140	-0,001	-0,006	0,002		0,002	00
160	0,001	-0,006	0,003		0,003	00
180	-0,001	-0,004	-0,001		0,002	00
200	-0,001	-0,004	-0,001		-	00

Procijenjene vrijednosti standardnih nesigurnosti i procijenjena kombinovana standardna nesigurnost, koja se može procijeniti iz rezultata kalibracije date su u tabeli II-21.

Tabela II-21. Standardne nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

Sila, kN	Standardne nesigurnosti, %						u_{cpet} , %
	u_{fo}	u_{res}	$u_{b'}$	u_b	u_v	u_{fc}	
20	0,00087	-0,00144	0,00433	-0,01000	-0,03465	0,00438	0,037
40	0,00087	-0,00072	0,00289	-0,00864	-0,01083	0,00082	0,014
60	0,00087	-0,00048	0,00241	-0,00594	-0,00265	-0,00011	0,007
80	0,00087	-0,00036	0,00180	-0,00542	-0,00343	-0,00019	0,007
100	0,00087	-0,00029	0,00144	-0,00456	-0,00130	-0,00048	0,005
120	0,00087	-0,00024	0,00024	-0,00312	0,00108	-0,00079	0,004
140	0,00087	-0,00021	-0,00021	-0,00296	0,00062	0,00044	0,003
160	0,00087	-0,00018	0,00018	-0,00362	0,00081	0,00068	0,004
180	0,00087	-0,00016	-0,00032	-0,00241	0,00048	-0,00022	0,003
200	0,00087	-0,00014	-0,00029	-0,00200	-	-0,00010	0,002

U tabeli br. II-22. date su vrijednosti standardne kombinovane nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije i standardne nesigurnosti referentnog etalona na bazi kojih je procijenjena standardna kombinovana nesigurnost prenosnog etalona.

Tabela II-22. Vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} , i u_c po pojedinim kalibracionim tačkama, MGCplus-Z4/200 kN-područje zatezanja

Sila, kN	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
u_{cpet} , %	0,037	0,014	0,007	0,007	0,005	0,004	0,003	0,004	0,003	0,002
u_{ref} , %	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
u_c , %	0,044	0,029	0,026	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025

Proširena mjerna nesigurnost U data je kao proizvod standardnog odstupanja i faktora prekrivanja $k=2$ prema EURAMET/cg-04:2011 i BAS EN ISO 376:2005. Ne sadrži nikakav doprinos u pogledu dugoročne nestabilnosti prenosnog etalona. Izmjerene vrijednosti su u okviru datog intervala sa vjerovatnoćom od 95 %.

U tabeli II-23. date su procijenjene vrijednosti proširenih mjernih nesigurnosti i izvršena je klasifikacija prenosnog etalona za sve nivoe sile u kalibrisanom mjernom području u skladu sa standardom BAS EN ISO 376:2005.

Tabela II-23. Klasifikacija i proširena mjerna nesigurnost, MGCplus-Z4/200 kN-područje zatezanja

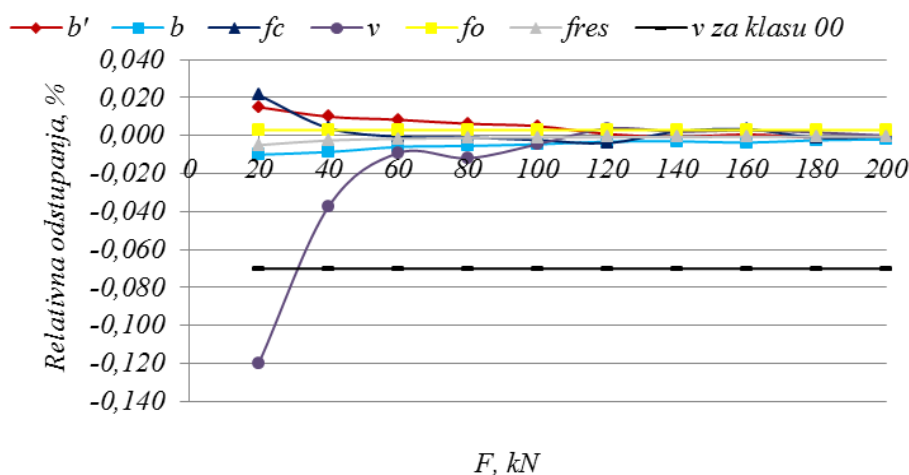
Sila, kN	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Klasa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U , %	0,089	0,058	0,052	0,052	0,051	0,051	0,050	0,051	0,050	0,050

5.6.1 Interpretacija rezultata

Relativna odstupanja u ovisnosti od sile data su na slici II-22. Sve vrijednosti kriterija za klasifikaciju prenosnog etalona, za određenu klasu, moraju zadovoljiti zahtjeve date u tabeli I-6, tačka 3.3., da bi se nivo sile kalibrisanog mjernog područja mogao klasificirati u

tu klasu. Procijenjeni kriterij histereze za kalibracionu tačku 20 kN u iznosu od -0,120 % zadovoljava za klasu 05 prenosnog etalona prema BAS EN ISO 376:2005. Iz tog razloga prenosni etalon je za ovaj nivo sile mjernog područja klasificiran u klasu 05.

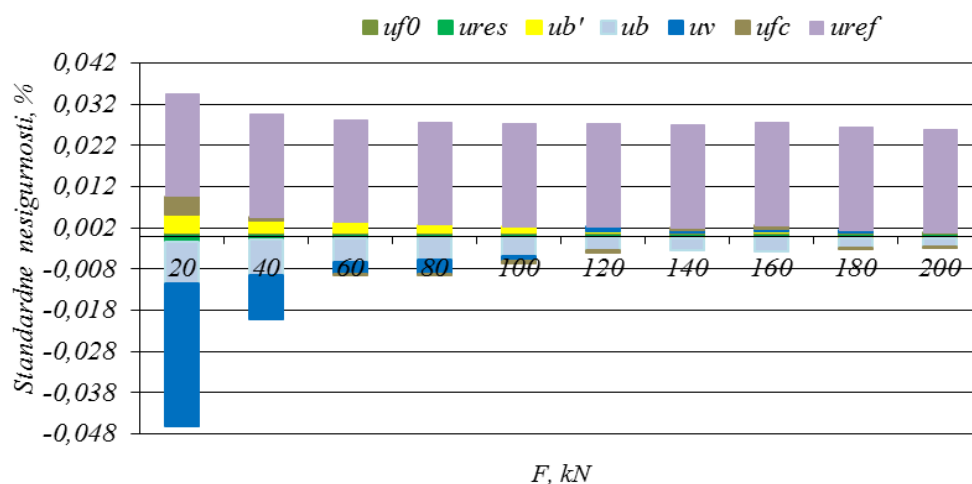
Kriteriji klasifikacije za ostale kalibracione tačke zadovoljavaju klasu 00 u skladu sa BAS EN ISO 376:2005. Kada se uzme u obzir kriterij klasifikacije koji se odnosi na nesigurnost primjenjene kalibracione sile, odnosno referentnog etalona u iznosu od 0,05% prenosni etalon se klasificira u klasu 1 za cijelo kalibrisano mjerno područje.



Slika II-22. Procijenjena relativna odstupanja u zavisnosti od sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

Sa slike se vidi da se sva procijenjena relativna odstupanja u apsolutnom iznosu smanjuju sa porastom sile te da imaju najveće vrijednosti kod sile 20 kN, nakon toga njihova vrijednost se znatno smanjuje kod sile 40 kN, da bi kod vrijednosti sile 60 kN do 200 kN imali približno isti iznos. Prenosni etalon se najstabilnije ponaša u 30 % do 100 % mjernog područja.

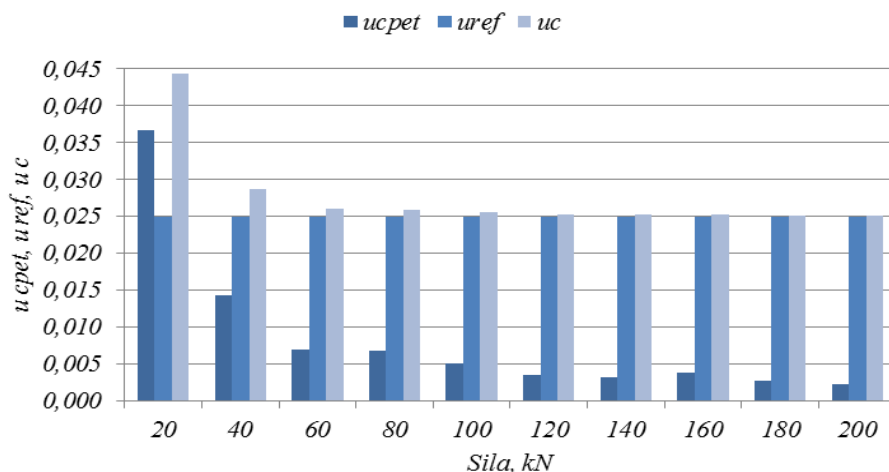
Vrijednosti standardnih nesigurnosti procijenjenih iz rezultata kalibracije prenosnog etalona na bazi relativnih grešaka i nesigurnost referentnog etalona, koje čine kombinovanu nesigurnost prenosnog etalona, u zavisnosti od primjenjene sile grafički su prikazani na slici II-23.



Slika II-23. Doprinos standardnih nesigurnosti u ovisnosti od primijenjene sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanja

Sa slike se vidi da standardna nesigurnost referentnog etalona ima najveći doprinos kombinovanoj nesigurnosti prenosnog etalona. Najmanji doprinos kombinovanoj nesigurnosti procijenjen je od standardne nesigurnosti nule i rezolucije sistema za očitavanje izlaznog signala na pojačivačkom sistemu MGCplus. Vrijednosti standardnih nesigurnosti prenosnog etalona procijenjene iz rezultata kalibracije pokazuju dobru stabilnost prenosnog etalona u mjernom području od 30 % do 100 % kalibrisanog područja. Nešto veća vrijednost standardne nesigurnosti histereze u iznosu od -0,03465 % na prvoj kalibracionoj tački, znatno doprinosi povećanju vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti prenosnog etalona. Na ostalim nivoima sile kalibrisanog mjernog područja standardna nesigurnost referentnog etalona je veća od vrijednosti kombinovane nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona.

Vrijednosti kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona u_{cpet} procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona, nesigurnost referentnog etalona u_{ref} i kombinovana nesigurnost prenosnog etalona u_c za pojedine nivoe sile kalibrisanog mjernog područja grafički su prikazani na slici II-24.



Slika II-24. Doprinos u_{ref} i u_{cpet} u kombinovanoj nesigurnosti u ovisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/200 kN – područje zatezanje

Sa slike se vidi da je najveći doprinos u kombinovanoj nesigurnosti procijenjen od nesigurnosti referentnog etalona u iznosu od 0,025 %. Kombinovana nesigurnost ima najveću vrijednost u kalibracionoj tački 20 kN. Ta vrijednost potiče ne samo od nesigurnosti referentnog etalona nego i dobrim dijelom od nesigurnosti histereze. Za nivoe sile od 30 % kalibrisanog mjernog područja kombinovana nesigurnost ima neznatno veću vrijednost od vrijednosti nesigurnosti referentnog etalona, što ukazuje na visoku stabilnost prenosnog etalona u 30 % do 100 % mjernog područja.

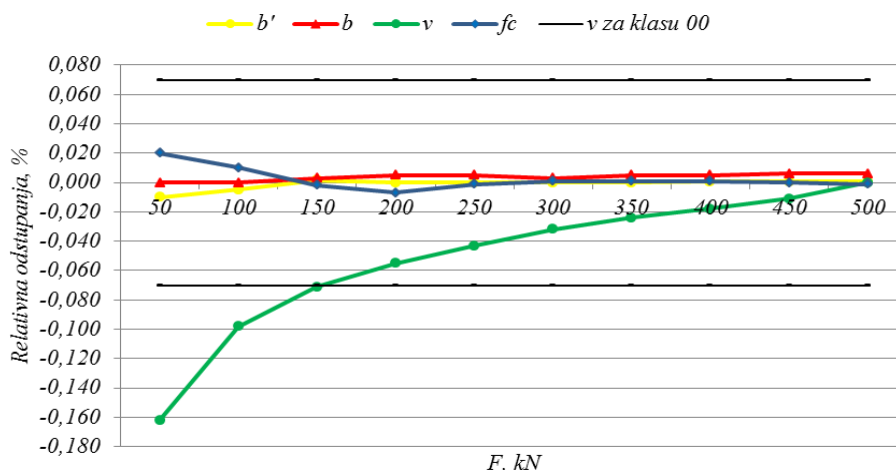
5.7 Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN

Procedura kalibracije, procjena relativnih odstupanja i standardnih nesigurnosti je ista kao kod kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN. Kalibracija je realizovana u području pritiska i području zatezanja.

Rezultati kalibracije, procjena relativnih odstupanja i klasifikacija etalona, procjena standardnih, kombinovane i proširene nesigurnosti za kalibraciju u području pritiska i zatezanja dati su u prilogu A.

5.7.1 Interpretacija rezultata

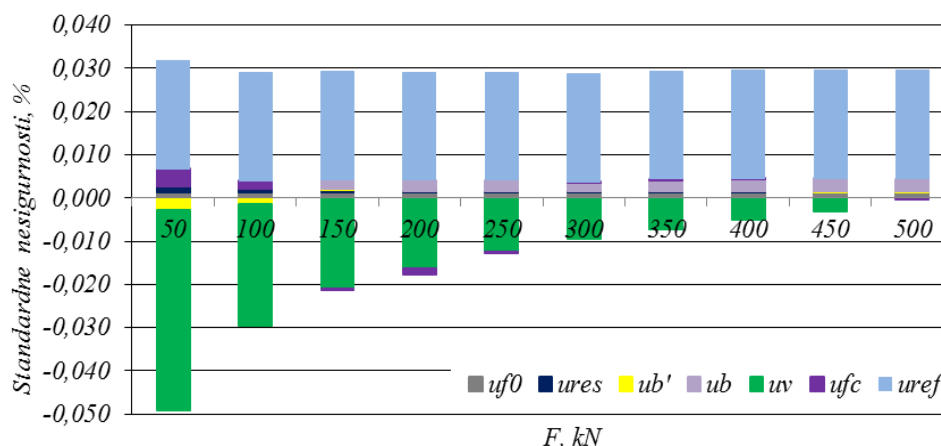
Relativna odstupanja u ovisnosti od vrijednosti sile, kod kalibracije prenosnog etalona u području pritiska, data su na slici II-25. Sve vrijednosti procijenjenih kriterija, za klasifikaciju prenosnog etalona, nalaze se u granicama za klasu 00 za >30 % do 100 %, za klasu 05 za nivoe vrijednosti sile od 20 % i 30% mjernog područja i za klasu 1 za kalibracionu tačku 50 kN. Za nivoe vrijednosti sile do 40 % mjernog područja etalon se klasificirao u nižu klasu zbog vrijednosti relativne greške histereze koja prelazi 0,071 % što je granica za klasu 00. Ako se uzme u obzir doprinos mjerne nesigurnosti od referentne mašine prenosni etalon se klasificira u klasu 1 prema BAS EN ISO 376:2005 što je potpuno zadovoljavajuće sa aspekta ispitnog standarda u pogledu klase mašine.



Slika II-25. Relativno odstupanje u zavisnosti od sile, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Vrijednosti relativnih odstupanja smanjuju sa porastom vrijednosti sile. Relativno odstupanje histereze imalo je odlučujući uticaj za klasifikaciju etalona do 30 % mjernog područja. Ostale vrijednosti relativnih odstupanja zadržale su se u granicama za klasu 00 prenosnog etalona.

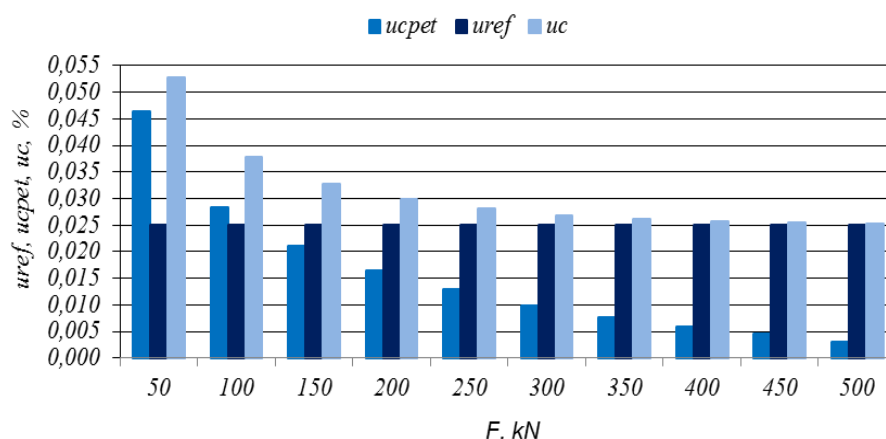
Vrijednosti standardnih nesigurnosti procijenjenih iz rezultata kalibracije prenosnog etalona, kalibrisanog u području pritiska, na bazi relativnih grešaka i nesigurnost referentnog etalona, koje čine kombinovanu nesigurnost prenosnog etalona, u zavisnosti od primjenjene sile grafički su prikazani na slici II-26.



Slika II-26. Udio standardnih nesigurnosti u zavisnosti od primjenjene sile, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Sa slike se vidi da standardna nesigurnost histereze ima najveći doprinos kombinovanoj nesigurnosti prenosnog etalona za prvi nivo sile kalibrisanog mjernog područja. Najmanji doprinos kombinovanoj mjernoj nesigurnosti procijenjen je od standardne nesigurnosti nule i rezolucije sistema za očitavanje izlaznog signala na pojačivačkom sistemu MGCplus. Vrijednosti standardnih nesigurnosti prenosnog etalona procijenjene iz rezultata kalibracije pokazuju dobru stabilnost prenosnog etalona u mjernom području od >30 % do 100 % kalibrisanog područja. Nešto veće vrijednosti standardne nesigurnosti histereze na nivoima sile do 30 % mjernog područja znatno doprinose povećanju vrijednosti proširene nesigurnosti prenosnog etalona. Na ostalim nivoima sile kalibrisanog mjernog područja, standardna nesigurnost referentnog etalona je veća od vrijednosti kombinovane nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije prenosnog etalona. Zbog vrijednosti nesigurnosti referentnog etalona prenosni etalon je klasificiran u klasu 1 za cijelo mjerno područje.

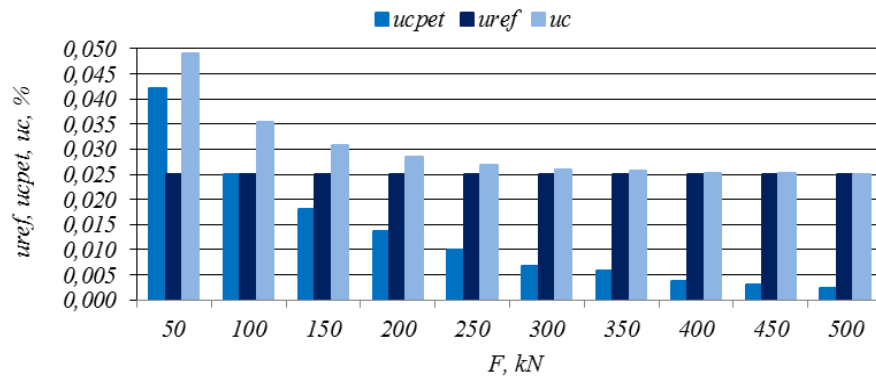
Vrijednosti kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona u_{cpet} procijenjene iz rezultata kalibracije u području pritiska, nesigurnost referentnog etalona u_{ref} i standardna kombinovana nesigurnost prenosnog etalona u_c za pojedine nivoe sile kalibrisanog mjernog područja grafički su prikazani na slici II-27.



Slika II-27. Doprinos u_{ref} i u_{cpet} u kombinovanoj nesigurnosti u ovisnosti od primijenjene sile, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Sa slike se vidi da je najveći doprinos kombinovanoj mjernoj nesigurnosti procijenjen od nesigurnosti referentnog etalona u iznosu od 0,025 % za nivoe sile od 30 % do 100 % kalibrisanog mjernog područja. Kombinovana nesigurnost ima najveću vrijednost u kalibracionim tačkama 50 kN i 100 kN, odnosno do 20 % kalibrisanog mjernog područja. Ta vrijednost potiče ne samo od nesigurnosti referentnog etalona nego i dobrim dijelom od standardne nesigurnosti histereze. Za nivoe sile od 30 % kalibrisanog mjernog područja kombinovana nesigurnost ima neznatno veću vrijednost od vrijednosti nesigurnosti referentnog etalona, što ukazuje na visoku stabilnost prenosnog etalona u 30 % do 100 % mjernog područja.

Vrijednosti kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona u_{cpet} procijenjene iz rezultata kalibracije u području zatezanja, nesigurnost referentnog etalona u_{ref} i kombinovana nesigurnost prenosnog etalona u_c za pojedine nivoe sile kalibrisanog mjernog područja grafički su prikazani na slici II-28.



Slika II-28. Doprinos u_{ref} i u_{cpet} kombinovanoj nesigurnosti u ovisnosti od primijenjene sile, MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

Prenosni etalon, kod kalibracije u području zatezanja, pokazuje gotovo isto ponašanje kao kod kalibracije u području pritiska u pogledu relativnih grešaka, procijenjenih standardnih, kombinovane i proširene nesigurnosti. Takođe, kod kalibracije etalona u području zatezanja potvrđena je stabilnost etalona u 30 % do 100 % kalibrisanog mjernog područja.

5.8 Mogućnost korištenja prenosnog etalona koji je kalibrisan u jednom području za kalibraciju ispitnih mašina i u području pritiska i u području zatezanja

U cilju dokazivanja mogućnosti korištenja prenosnog etalona za kalibraciju ispitnih mašina i u području pritiska i u području zatezanja urađeno je upoređivanje relativnih odstupanja, na osnovu kojih se klasificira prenosni etalon, koja su procijenjena kod kalibracije prenosnih etalona u području pritiska i u području zatezanja.

5.8.1 Rezultati poređenja prenosnog etalona MGCplus-Z4/200 kN

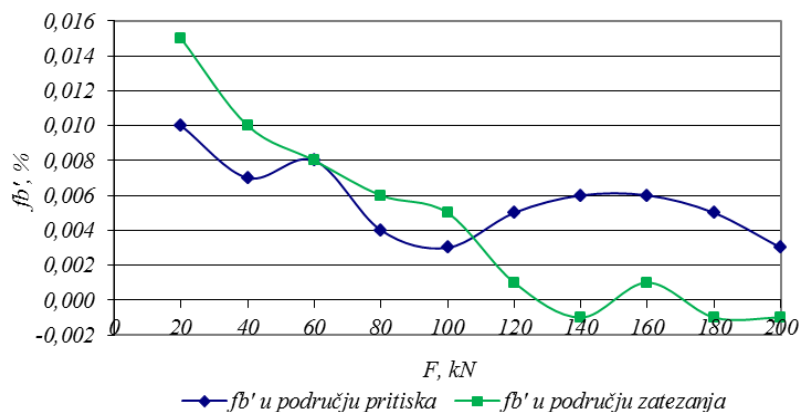
Relativna odstupanja koja se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije prenosnog etalona uporedo kod kalibracije prenosnog etalona u području pritiska i području zatezanja data su u tabeli II-24.

Tabela II-24. Relativna odstupanja uporedo kod kalibracije u području pritiska i području zatezanja, MGCplus-Z4/200 kN

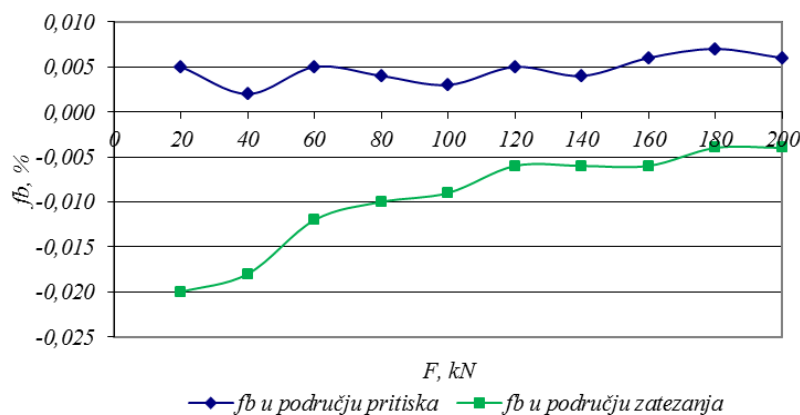
Sila, kN	Relativna odstupanja, %											
	f_o		f_{res}		$f_{b'}$		f_b		f_v		f_c	
	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z
20	0,002	0,003	0,005	-0,005	0,010	0,015	0,005	-0,020	-0,072	-0,120	0,011	0,021
40			0,002	-0,003	0,007	0,010	0,002	-0,018	-0,026	-0,038	0,006	0,004
60			0,002	-0,002	0,008	0,008	0,005	-0,012	0,002	-0,009	0,000	-0,001
80			0,001	-0,001	0,004	0,006	0,004	-0,010	0,011	-0,012	-0,002	-0,001
100			0,001	-0,001	0,003	0,005	0,003	-0,009	0,019	-0,005	-0,005	-0,002
120			0,001	-0,001	0,005	0,001	0,005	-0,006	0,014	0,004	0,002	-0,004
140			0,001	-0,001	0,006	-0,001	0,004	-0,006	0,010	0,002	0,000	0,002
160			0,001	-0,001	0,006	0,001	0,006	-0,006	0,006	0,003	0,002	0,003
180			0,001	-0,001	0,005	-0,001	0,007	-0,004	0,003	0,002	-0,001	-0,001
200			0,000	-0,001	0,003	-0,001	0,006	-0,004	-	-	0,000	-0,001

P – kalibracija u području pritiska; Z – kalibracija u području zatezanja

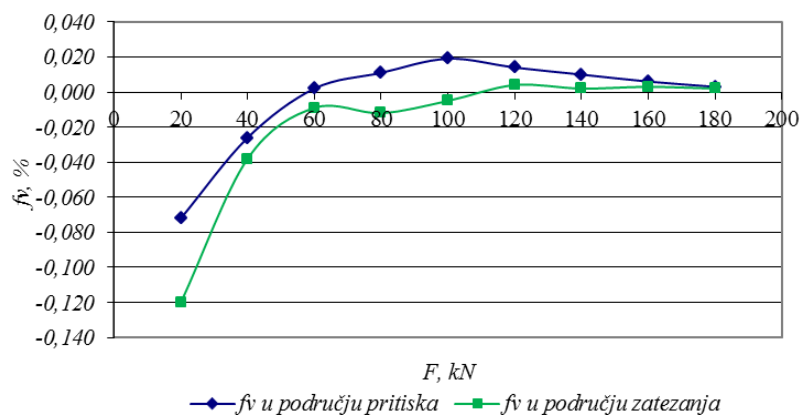
Na slikama II-29., II-30., II-31. i II-32. dat je prikaz relativnih odstupanja u zavisnosti od vrijednosti sile, uporedo kod kalibracije prenosnog etalona u području pritiska i u području zatezanja.



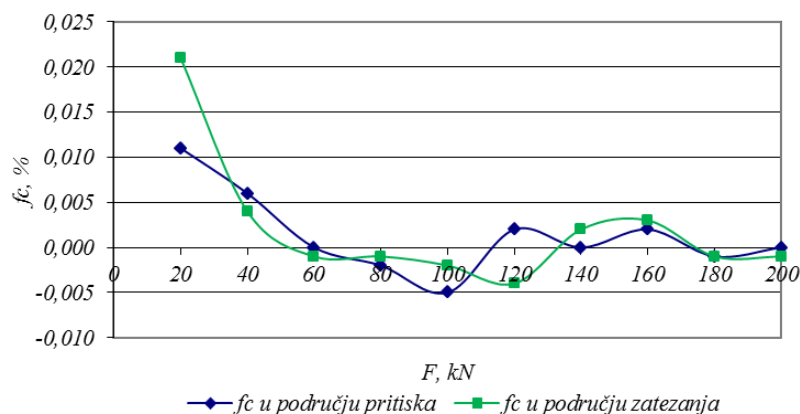
Slika II-29. Uporedni prikaz relativnog odstupanja ponovljivosti, MGCplus-Z4/200 kN



Slika II-30. Uporedni prikaz relativnog odstupanja obnovljivosti, MGCplus-Z4/200 kN



Slika II-31. Uporedni prikaz relativnog odstupanja histereze, MGCplus-Z4/200 kN



Slika II-32. Uporedni prikaz relativnog odstupanja interpolacije, MGCplus-Z4/200 kN

Sa slika se vidi da se prenosni etalon gotovo identično ponaša kod kalibracije u području pritiska i u području zatezanja. Sva relativna odstupanja, u apsolutnom iznosu, smanjuju se sa porastom sile i imaju najveće vrijednosti na prvoj kalibracionoj tački (20 kN), da bi kod sile od 60 kN do 200 kN, odnosno od 30 % do 100 % mjernog područja, imali gotovo istu vrijednost.

Vrijednosti kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona procijenjene iz rezultata kalibracije u_{cpet} , nesigurnost referentnog etalona u_{ref} , standardna kombinovana nesigurnost u_c , proširena nesigurnost i klasifikacija etalona uporedo za kalibraciju u području pritiska i zatezanja u ovisnosti od vrijednosti sile date su u tabeli II-25.

Tabela II-25. Uporedne vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} , u_c , U i klasifikacija etalona u ovisnosti o sili, MGCplus-Z4/200 kN

Sila, kN	u_{cpet} , %		u_{ref} , %		u_c , %		U , %		Klasa
	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	
20	0,021	0,037	0,025	0,025	0,033	0,044	0,066	0,089	1
40	0,008	0,014	0,025	0,025	0,026	0,029	0,053	0,058	1
60	0,004	0,007	0,025	0,025	0,025	0,026	0,051	0,052	1
80	0,004	0,007	0,025	0,025	0,025	0,026	0,051	0,052	1
100	0,006	0,005	0,025	0,025	0,026	0,026	0,051	0,051	1
120	0,005	0,004	0,025	0,025	0,025	0,025	0,051	0,050	1
140	0,004	0,003	0,025	0,025	0,025	0,025	0,051	0,050	1
160	0,004	0,004	0,025	0,025	0,025	0,025	0,051	0,051	1
180	0,004	0,003	0,025	0,025	0,025	0,025	0,051	0,050	1
200	0,003	0,002	0,025	0,025	0,025	0,025	0,050	0,050	1

P – kalibracija u području pritiska; Z – kalibracija u području zatezanja

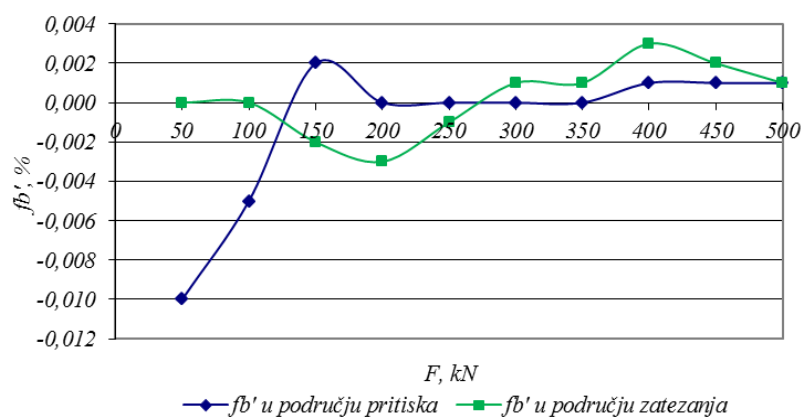
5.8.2 Rezultati poređenja prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN

Standardna odstupanja koja se mogu ocijeniti iz rezultata kalibracije prenosnog etalona uporedo kod kalibracije prenosnog etalona u području pritiska i području zatezanja data su u tabeli II-26., a na slikama II-33, II-34., II-35. i II-36. dat je prikaz uporednih procjena odstupanja u ovisnosti od vrijednosti sile.

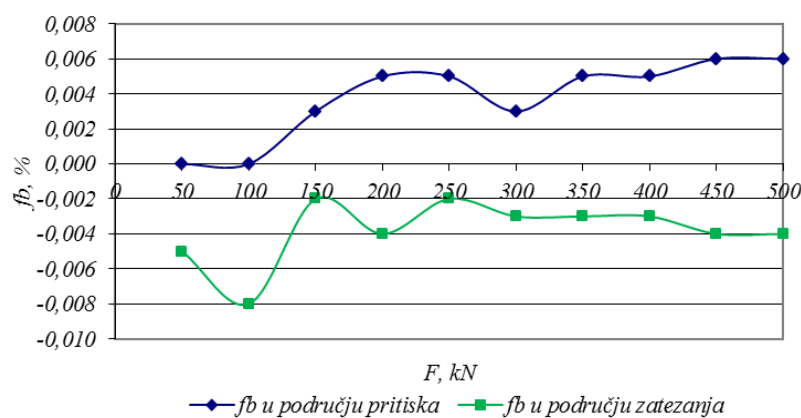
Tabela II-26. Relativna odstupanja uporedo kod kalibracije u području pritiska i području zatezanja, MGCplus-Z4/500 kN

Sila, kN	Relativna odstupanja, %											
	f_o		f_{res}		$f_{b'}$		f_b		f_v		f_c	
	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z
50	0,005	-0,001	0,005	-0,005	-0,010	0,000	0,000	-0,005	-0,160	-0,145	0,020	0,014
100			0,003	-0,003	-0,005	0,000	0,000	-0,008	-0,097	-0,086	0,010	-0,002
150			0,002	-0,002	0,002	-0,002	0,003	-0,002	-0,073	-0,063	-0,002	-0,003
200			0,001	-0,001	0,000	-0,003	0,005	-0,004	-0,056	-0,047	-0,007	0,000
250			0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,005	-0,002	-0,044	-0,034	-0,001	0,002
300			0,001	-0,001	0,000	0,001	0,003	-0,003	-0,033	-0,023	0,001	0,000
350			0,001	-0,001	0,000	0,001	0,005	-0,003	-0,025	-0,019	0,001	-0,001
400			0,001	-0,001	0,001	0,003	0,005	-0,003	-0,018	-0,012	0,001	0,001
450			0,001	-0,001	0,001	0,002	0,006	-0,004	-0,011	-0,008	0,000	-0,001
500			0,001	0,000	0,001	0,001	0,006	-0,004	-	-	-0,001	0,000

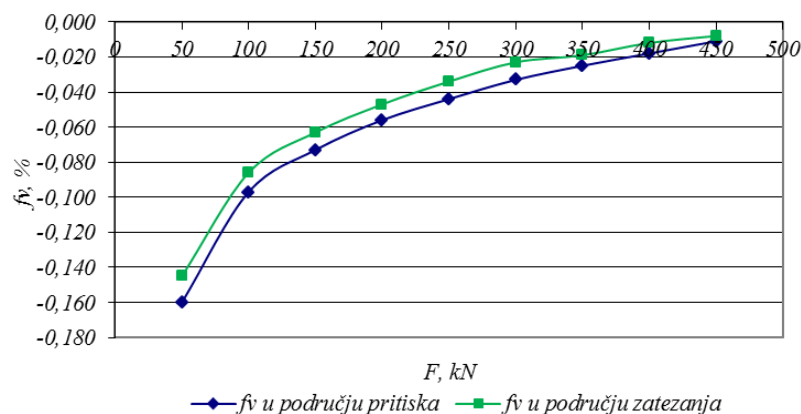
P – kalibracija u području pritiska; Z – kalibracije u području zatezanja



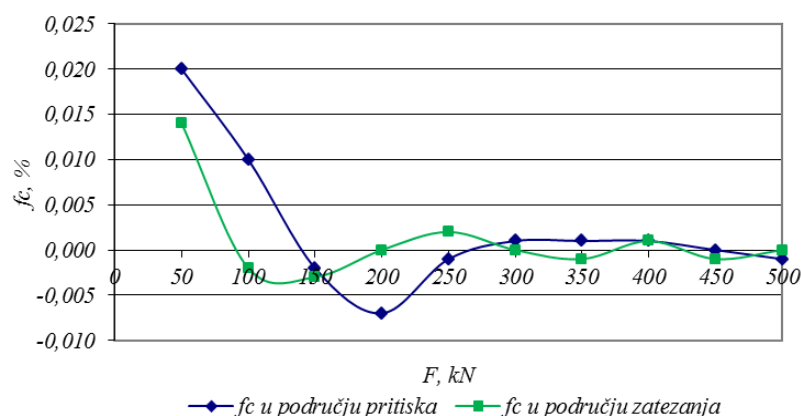
Slika II-33. Uporedni prikaz relativnog odstupanja ponovljivosti, MGCplus-Z4/500 kN



Slika II-34. Uporedni prikaz relativnog odstupanja obnovljivosti, MGCplus-Z4/500 kN



Slika II-35. Uporedni prikaz relativnog odstupanja histereze, MGCplus-Z4/500 kN



Slika II-36. Uporedni prikaz relativnog odstupanja interpolacije, MGCplus-Z4/500 kN

Sa slika se vidi da se prenosni etalon gotovo identično ponaša kod kalibracije u području pritiska i u području zatezanja. Sva relativna odstupanja, u apsolutnom iznosu, smanjuju se sa porastom sile i imaju najveće vrijednosti na prvoj kalibracionoj tački (50 kN), da bi kod sile od 150 kN do 500 kN, odnosno od 30 % do 100 % mjernog područja, imali gotovo istu vrijednost.

Vrijednosti kombinovane nesigurnosti prenosnog etalona procijenjene iz rezultata kalibracije $u_{c_{pet}}$, nesigurnost referentnog etalona u_{ref} , kombinovana nesigurnost u_c , proširena nesigurnost i klasifikacija etalona uporedo za kalibraciju u području pritiska i zatezanja u ovisnosti od vrijednosti sile date su u tabeli II-27.

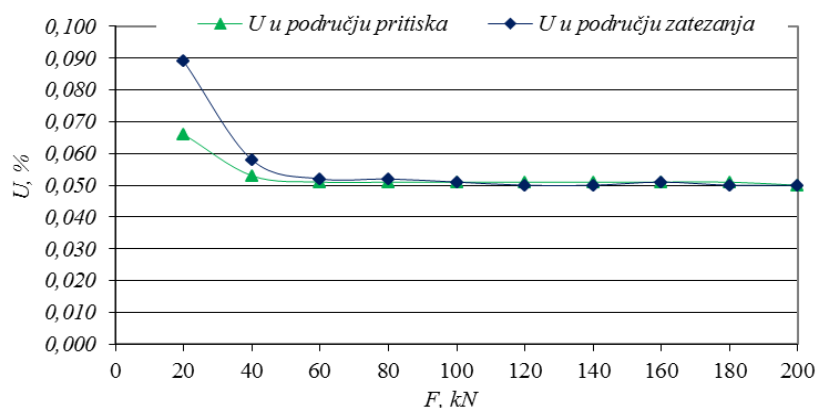
Tabela II-27. Uporedne vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} , u_c , U i klasifikacija etalona u ovisnosti o sili, MGCplus-Z4/500 kN

Sila, kN	u_{cpet} , %		u_{ref} , %		u_c , %		U , %		Klasa
	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	
50	0,046	0,042	0,025	0,025	0,053	0,049	0,106	0,098	1
100	0,028	0,025	0,025	0,025	0,038	0,035	0,075	0,071	1
150	0,021	0,018	0,025	0,025	0,033	0,031	0,065	0,062	1
200	0,017	0,014	0,025	0,025	0,030	0,028	0,060	0,057	1
250	0,013	0,010	0,025	0,025	0,028	0,027	0,056	0,054	1
300	0,010	0,007	0,025	0,025	0,027	0,026	0,054	0,052	1
350	0,008	0,006	0,025	0,025	0,026	0,026	0,052	0,051	1
400	0,006	0,004	0,025	0,025	0,026	0,025	0,051	0,051	1
450	0,004	0,003	0,025	0,025	0,025	0,025	0,051	0,050	1
500	0,003	0,002	0,025	0,025	0,025	0,025	0,050	0,050	1

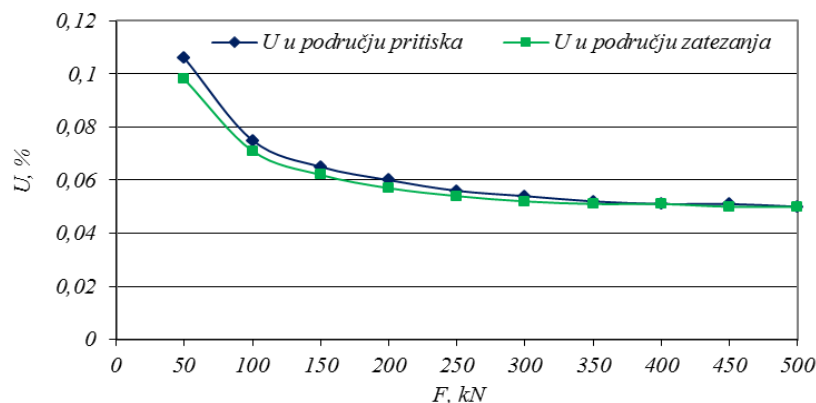
P – kalibracija u području pritiska, Z – kalibracija u području zatezanja

5.8.3 Interpretacija rezultata

Prikaz proširene nesigurnosti uporedo kod kalibracije u području pritiska i području zatezanja dat je na slici II-37. za prenosni etalon MGCplu-Z4/200 kN i na slici II-38 za prenosni etalon MGCplus-Z4/500 kN.



Slika II-37. Uporedni prikaz proširene mjerne nesigurnosti – MGCplus-Z4/200 kN



Slika II-38. Uporedni prikaz proširene mjerne nesigurnosti – MGCplus-Z4/500 kN

Sa slika se vidi da vrijednosti proširenih mjernih nesigurnosti prenosnih etalona, kada se kalibrišu u području pritiska i u području zatezanja, imaju gotovo identične vrijednosti u 30 % do 100 % mjernog područja kalibracije prenosnog etalona.

Shodno navedenom, može se zaključiti da je dovoljna kalibracija prenosnog etalona ili u području pritiska ili u području zatezanja, a da se isti koristi za kalibraciju uređaja za mjerenje sile i u području pritiska i u području zatezanja.

Kalibracija prenosnog etalona realizovana je u mjernom području od 10 % do 100 %, ali kod njegove upotrebe za kalibraciju ispitnih uređaja za mjerenje sile najbolje ga koristiti od 30 % do 100 % mjernog područja, jer u tom području etalon pokazuje najbolju stabilnost.

5.9 Procjena kalibracione mjerne mogućnosti (CMC) Mehaničkog kalibracionog laboratorija za mjerno područje od 20 kN do 500 kN

Za procjenu kalibracione mjerne mogućnosti laboratorija korištena je procedura opisana u tački 4.1.

Nakon kalibracije prenosnih etalona procijenjene su kombinovane odnosno proširene mjerne nesigurnosti i prenosni etaloni su klasificirani u klasu 1 u skladu sa standardom BAS EN ISO 376:2005. Proširena mjerna nesigurnost prenosnih etalona uzeta je u obzir, kao jedan od doprinosa kod procjene CMC laboratorija. Takođe, kod procjene CMC uzeta je u obzir i dugoročna nestabilnost etalona čiji doprinos nije obuhvaćen kod procjene mjerne nesigurnosti prenosnog etalona. Proširene mjerne nesigurnosti prenosnih etalona u području kalibracije pritiska i zatezanja date su u tabeli II-28.

Tabela II-28. Proširene mjerne nesigurnosti prenosnih etalona

Prenosni etalon		MGCplus-Z4/200 kN od 20 kN do 200 kN	MGCplus-Z4/500 kN od 50 kN do 500 kN
U, %	Područje pritiska	0,066 - 0,050	0,106 – 0,050
	Područje zatezanja	0,089 - 0,050	0,098 – 0,050

Pored navedenih doprinosa, za procjenu CMC uzeti su i doprinosi procijenjeni kod kalibracije univerzalnih hidrauličnih mašina (kidalice), 20 SZBDA – mjerno područje 200 kN i 50 SZBDA – mjerno područje 500 kN.

Kalibracija kidalice realizovana je u području pritiska i na mjestu instaliranja što je u skladu sa procedurom opisanom u BAS EN ISO 7500-1:2005. Procedura opisana u metodi kalibracije za klasifikaciju provjeravane kidalice bazira se na kalibraciji sistema za mjerenje sile.

Budući da su obje kidalice osavremenjene ZWICK modulom i softverom testXpert V 7.1, istovremeno je kalibrisana analogna skala kidalice i pokazivanje softvera.

Tabela II-29. opisuje uslove kod kalibracije kidalice 20 SZBDA i 50 SZBDA, osnovne podatke o kidalicama i korištenim prenosnim etalonima za kalibraciju.

Tabela II-29. Osnovni parametri kod kalibracije kidalice 20 SZBDA i 50 SZBDA

Uvjeti okoline		$t=(21,0-21,5)^{\circ}C$		
Kidalice		Prenosni etalon		
Tip	20 SZBDA	MGCplus	AB 22 A ML30	
Mjerno područje	20 kN do 200 kN	Mjerna ćelija Z4/200 kN	Proširena mjerna nesigurnost, % 0,050 do 0,066	
Rezolucija				
Analogna skala	40 N (podio 200 N, odnos 1/5)	Konekcioni kabel	Dužina	Izvedba/Tehnika spajanja
Softver	1 N		5,85 m	6-žilni/7-polna
Uvjeti okoline		$t=(22,0-23,0)^{\circ}C$		
Kidalice		Prenosni etalon		
Tip	50 SZBDA	MGCplus	AB 22 A ML30	
Mjerno područje	100 kN do 500 kN	Mjerna ćelija Z4/500 kN	Proširena mjerna nesigurnost, % 0,050 do 0,075	
Rezolucija				
Analogna skala	0,1 kN (podio 1 kN, odnos 1/10)	Konekcioni kabel	Dužina	Izvedba/Tehnika spajanja
Softver	1 N		5,90 m	6-žilni/7-polna

Na slici II-39. prikazane su kidalice a na slici II-40. pozicionirane mjerne ćelije u toku kalibracije.



Slika II-39. Kidalice 20 SZBDA i 50 SZBDA



Slika II-40. Pozicionirana mjerna ćelija u kidalici

U tabeli II-30. prikazani su rezultati kalibracije analogne skale kidalice 20 SZBDA i relativne greške procijenjene prema jednačinama datim u tački 4.1.3, u mjernom području od 20 kN do 200 kN.

Tabela II-30. Rezultati kalibracije analogne skale kidalice 20 SZBDA

Opterećenje, <i>kN</i>						Relativne greške, %			
Stvarno	Indicirano na analognoj skali								
	<i>0°</i>		<i>120°</i>	<i>240°</i>		<i>q</i>	<i>b'</i>	<i>ν</i>	<i>Res</i>
	Bez kazaljke	Sa kazaljkom							
20	20,00	20,02	20,03	20,00	20,03	0,10	0,15	0,15	0,20
40	40,08	40,05	40,07	40,10	40,15	0,18	0,13	0,12	0,10
80	80,45	80,40	80,55	80,45	80,50	0,59	0,19	0,06	0,05
120	120,60	120,55	120,75	120,65	120,74	0,54	0,17	0,07	0,03
160	160,60	160,80	161,05	160,85	160,95	0,56	0,28	0,06	0,03
200	200,70	200,85	201,10	200,80	200,80	0,46	0,20	0,00	0,02

Od relativnih grešaka procijenjenih iz rezultata kalibracije analogne skale, procijenjene su pripadajuće standardne nesigurnosti koje se odnose na ponovljivost, povratnost i rezoluciju analogne skale. Vrijednosti standardnih nesigurnosti procijenjenih iz rezultata kalibracije analogne skale date su u tabeli II-31. U tabeli je data i standardna nesigurnost prenosnog etalona koji se koristio za kalibraciju analogne skale kidalice. Na bazi svih standardnih nesigurnosti, a prema jednačini 2-37. izračunata je kombinovana nesigurnost. Proširena mjerna nesigurnost odgovara standardnoj mjernoj nesigurnosti koja je pomnožena sa faktorom prekrivanja $k=2$, koji za normalnu raspodjelu odgovara nivou povjerenja od približno 95 %.

Tabela II-31. Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost – analogna skala kidalice 20 SZBDA

Stvarno opterećenje, kN	Standardne nesigurnosti, %						u_c %	k	U %
	u_{rep}	u_{res}	u_v	u_{cal}	u_{drift}	u_{cpet}			
20	0,046	0,058	0,043	0,033	0,010	0,034	0,09	2	0,18
40	0,037	0,029	0,036	0,027	0,004	0,027	0,07		0,14
80	0,055	0,014	0,018	0,026	-0,004	0,026	0,06		0,12
120	0,048	0,010	0,022	0,026	-0,008	0,027	0,06		0,12
160	0,047	0,007	0,018	0,026	-0,009	0,028	0,06		0,12
200	0,046	0,006	0,000	0,025	-0,007	0,026	0,05		0,10

U tabeli II-32. dati su rezultati kalibracije pokazivanja softvera testXpert i procijenjene relativne greške u mjernom području od 20 kN do 200 kN.

Tabela II-32. Rezultati kalibracije pokazivanja softvera kidalice 20 SZBDA

Opterećenje, kN					Relativne greške, %			
Stvarno	Indicirano na softveru							
	0^0	120^0	240^0		q	b'	ν	res
20	20,010	20,020	20,000	20,025	0,05	0,10	0,12	0,005
40	40,220	40,275	40,220	40,265	0,60	0,14	0,11	0,003
80	80,280	80,405	80,290	80,255	0,41	0,16	-0,04	0,001
120	120,130	120,295	120,100	120,165	0,15	0,16	0,05	0,001
160	159,970	160,215	160,000	160,010	0,04	0,15	0,01	0,001
200	199,750	199,975	199,760	199,760	-0,09	0,11	0,00	0,001

Vrijednosti standardnih nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije pokazivanja softvera, standardna nesigurnost prenosnog etalona, kombinovana, odnosno proširena mjerna nesigurnost po kalibracionim tačkama date su u tabeli II-33.

Tabela II-33. Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost - pokazivanje softvera kidalice 20 SZBDA

Stvarno opterećenje, kN	Standardne nesigurnosti, %						u_c %	k	U %
	u_{rep}	u_{res}	u_v	u_{cal}	u_{drift}	u_{cpet}			
20	0,029	0,0014	0,036	0,033	0,010	0,034	0,06	2	0,12
40	0,046	0,0007	0,032	0,027	0,004	0,027	0,06		0,12
80	0,050	0,0004	-0,013	0,026	-0,004	0,026	0,06		0,12
120	0,051	0,0002	0,016	0,026	-0,008	0,027	0,06		0,12
160	0,048	0,0002	0,002	0,026	-0,009	0,028	0,06		0,12
200	0,037	0,0001	0,000	0,025	-0,007	0,026	0,05		0,10

Ako se uporede dobijene vrijednosti standardnih nesigurnosti vidi se, da su standardne nesigurnosti od korištenog prenosnog etalona identične što je i razumljivo jer je korišten isti prenosni etalon kod kalibracije analogne skale kidalice i kod kalibracije pokazivanja softvera. Kombinovana nesigurnost procijenjena iz rezultata kalibracije ima dosta manju vrijednost kod kalibracije pokazivanja softvera zbog manje vrijednosti standardne nesigurnosti rezolucije sistema za očitavanje sile.

U tabeli II-34. su prikazane vrijednosti nesigurnosti prenosnog etalona, nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije, kombinovana i proširena mjerna nesigurnost uporedo kod kalibracije analogne skale i pokazivanja softvera.

Tabela II-34. Uporedne vrijednosti nesigurnosti kod kalibracije analogne skale i kalibracije pokazivanja softvera – kidalica 20 SZBDA

Opterećenje <i>kN</i>	u_{cpet}		u_{cim}		u_c %		U %	
	Analogna skala	Softver	Analogna skala	Softver	Analogna skala	Softver	Analogna skala	Softver
20	0,034		0,086	0,045	0,09	0,06	0,18	0,12
40	0,027		0,059	0,041	0,07	0,06	0,14	0,12
80	0,026		0,060	0,048	0,06	0,06	0,12	0,12
120	0,027		0,054	0,051	0,06	0,06	0,12	0,12
160	0,028		0,051	0,048	0,06	0,06	0,12	0,12
200	0,026		0,046	0,037	0,05	0,05	0,10	0,10

Rezultati kalibracije kidalice 50 SZBDA, procijenjene relativne greške i procjena odgovarajućih standardnih nesigurnosti dati su u Prilogu B.

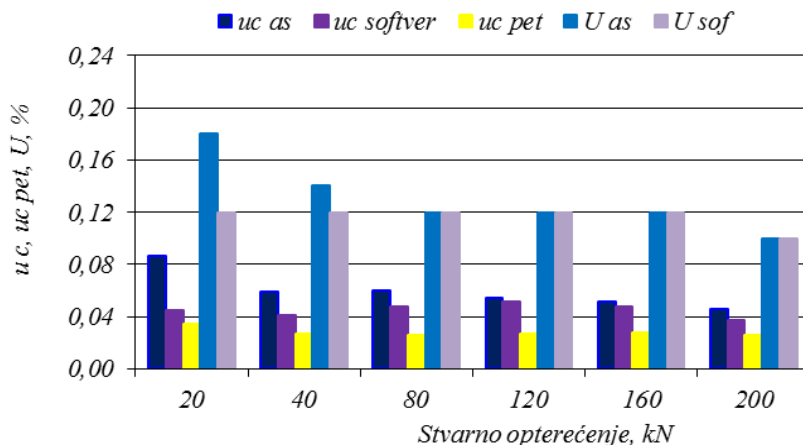
U tabeli II-35. prikazane su vrijednosti nesigurnosti od prenosnog etalona, nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije analogne skale i pokazivanja softvera, kombinovana i proširena mjerna nesigurnost uporedo kod kalibracije analogne skale i pokazivanja softvera kidalice 50 SZBDA.

Tabela II-35. Uporedne vrijednosti nesigurnosti kod kalibracije analogne skale i kalibracije pokazivanja softvera – kidalica 50 SZBDA

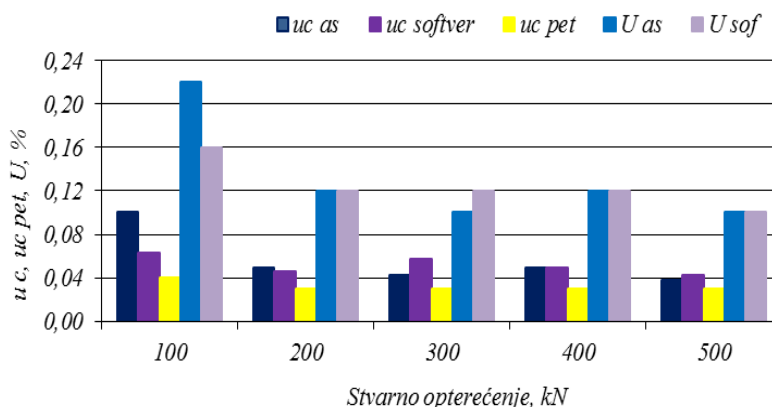
Opterećenje, <i>kN</i>	u_{cpet}		u_{cim}		u_c %		U %	
	Analogna skala	Softver	Analogna skala	Softver	Analogna skala	Softver	Analogna skala	Softver
100	0,04	0,04	0,10	0,04	0,11	0,06	0,22	0,16
200	0,03	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,12	0,12
300	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,10	0,12
400	0,03	0,03	0,05	0,03	0,06	0,05	0,12	0,12
500	0,03	0,03	0,04	0,00	0,05	0,04	0,10	0,10

5.9.1 Interpretacija rezultata

Prikaz kombinovane nesigurnosti, nesigurnosti korištenog prenosnog etalona za kalibraciju i proširene nesigurnosti uporedo kod kalibracije analogne kale i pokazivanja softvera dat je na slici II-41. za kidalicu 20 SZBDA i na slici II-42 za kidalicu 50 SZBDA.



Slika II-41. Uporedne vrijednosti nesigurnosti kod kalibracije analogne skale i pokazivanja softvera – kidalica 20 SZBDA



Slika II-42. Uporedne vrijednosti nesigurnosti kod kalibracije analogne skale i pokazivanja softvera – kidalica 50 SZBDA

Sa slike II-41. se vidi da kombinovana nesigurnost procijenjena iz rezultata kalibracije pokazivanja softvera, ima nižu vrijednost u odnosu na kombinovanu nesigurnost procijenjenu iz rezultata kalibracije analogne skale, u najvećoj mjeri zbog manje procijenjene standardne nesigurnosti rezolucije uređaja za očitavanje sile. Iz tog razloga za proračun CMC za mjerno područje od 20 kN do 100 kN uzeti su, kao relevantni, rezultati kalibracije pokazivanja softvera.

Sa slike II-42. se vidi da kombinovana nesigurnost procijenjena iz rezultata kalibracije pokazivanja softvera, u kalibracionim tačkama 100 kN i 200 kN ima nižu vrijednost zbog standardne nesigurnosti rezolucije skale uređaja za očitavanje sile, što rezultira manjom kombinovanom i proširenom mjernom nesigurnošću. U ostalim kalibracionim tačkama kombinovane i proširene mjerne nesigurnosti imaju iste vrijednosti, osim vrijednosti proširene nesigurnosti u kalibracionoj tački 300 kN, koja je nešto viša kod kalibracije pokazivanja softvera a koja je proistekla iz kombinovane nesigurnosti procijenjene iz rezultata kalibracije pokazivanja softvera, prvenstveno zbog standardne nesigurnosti histereze. Na kalibracionoj tački 100 kN, što predstavlja 20 % kalibrisanog mjernog područja, procijenjena je nešto veća proširena nesigurnosti u iznosu od 0,16 % i shodno tome ova kalibraciona tačka neće biti uzeta u obzir kod određivanja CMC laboratorija. Za ovu vrijednost sile prihvaćen je CMC od kalibracije pokazivanja softvera kidalice 20

SZBDA. Proširena mjerne nesigurnost na kalibracionoj tački 200 kN i kod kalibracije pokazivanja softvera kidalice 20 SZBDA i kidalice 50 SZBDA ima istu vrijednost od 0,12 %. Od rezultata kalibracije kidalice 50 SZBDA prihvaćen je CMC laboratorija za mjerno područje 200 kN do 500 kN.

Prilikom prikazivanja CMC laboratorija svakako će prekrivanje mjernih područja prenosnih etalona imati uticaj na CMC. Kako su u ovom radu obrađena dva prenosna etalona, MGCplus-Z4/200 kN, kalibrisan u mjernom području od 20 kN do 200 kN i sa izvedenim eksperimentom na kidalici 20 SZBDA i prenosni etalon MGCplus-Z4/500 kN, kalibrisan u mjernom području od 50 kN do 500 kN i sa izvedenim eksperimentom na kidalici 50 SZBDA, određen je CMC za mjerno područje od 20 kN do 500 kN.

Shodno definiciji CMC prihvaćena je kalibracija pokazivanja softvera kao eksperiment za određivanje CMC. Kod kalibracije analogne skale proširena mjerna nesigurnost ima nešto veću vrijednost zbog doprinosa nesigurnosti od rezolucije analogne skale i kao takva nije uzeta u obzir za procjenu CMC laboratorija.

Nakon svega provedenog, može se konstatovati da je za mjerno područje od 20 kN do 500 kN Mehanički laboratorij procijenio i eksperimentalno dokazao $CMC=0,12\%$. To je najveća proširena mjerna nesigurnost i uzeta je u obzir kod uvažavanja činjenice prekrivanja dva etalona u mjernom području od 50 kN do 200 kN.

Ova vrijednost CMC Mehaničkog kalibracionog laboratorija navedena je u Certifikatu o Akreditaciji LK-02-01, publikovana u dokumentima Instituta za akreditiranje Bosne i Hercegovine i dostupna je korisnicima usluga laboratorija.

6. ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata provedenih kalibracija i eksperimenta u okviru eksperimentalnog dijela rada može se zaključiti:

- Prenosni etaloni sile MGCplus-Z4/200 kN i MGCplus-Z4/500 kN kalibrisani su na GTM-ovoj referentnoj mašini u području pritiska i području zatezanja u skladu sa zahtjevima standarda BAS EN ISO 376:2005 u cilju njegove klasifikacije, korištenja za kalibraciju ispitnih mašina za mjerenje sile i procjene CMC Mehaničkog kalibracionog laboratorija u mjernom području od 20 kN do 500 kN.
- Na temelju rezultata mjerenja utvrđeno je postojanje veze između primjenjene sile i očitane promjene napona u mV/V što je prikazano polinomom različitog stepena. Date su jednačine interpolacije za polinome različitog stepena i izračunati su pripadajući koeficijenti na osnovu kojih je izračunato relativno interpolacijsko odstupanje za svaki stepen polinoma na temelju istih srednjih vrijednosti očitavanja mjernih nizova kod povećanja sile. Upoređene su dobijene vrijednosti i uočene su neznatne razlike kod polinoma trećeg, četvrtog i petog stepena i prihvaćen je polinom trećeg stepena kao optimalan za aproksimaciju. Interpolacijsko odstupanje kod polinoma prvog i drugog stepena prelaze graničnu vrijednost od $\pm 0,025\%$ za klasu 00 prenosnog etalona.
- Na temelju rezultata mjerenja procijenjeni su kriteriji za klasifikaciju prenosnih etalona i uočeno je da na klasifikaciju znatno utiče relativno odstupanje histereze na nižim nivoima sile, te da se na osnovu kriterija histereze prenosni etaloni mogu klasificirati u klasu 05, odnosno klasu 1 za nivoe sile do 30% mjernog područja. Prema svim kriterijima, procijenjenim na bazi rezultata kalibracije, prenosni etaloni su klasificirani u klasu 00 za 30 % do 100 % mjernog područja.

- Zbog vrijednosti *CMC* u iznosu od 0,05 % GTM referentnog etalona, što je granica za klasu 1 i uzimajući u obzir i ovaj kriterij za klasifikaciju, prenosni etaloni su klasificirani u klasu 1 kod kalibracije u području pritiska i zatezanja.
- Urađena je kvantifikacija doprinosa nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije i kvantifikacija nesigurnosti od referentnog etalona, procijenjena kombinovana i proširena mjerna nesigurnost. Najveći doprinos kombinovanoj mjernoj nesigurnosti daje nesigurnost referentnog etalona a na nižim nivoima sile nesigurnost relativnog odstupanja histereze.
- Prenosni etaloni se gotovo identično ponašaju kod kalibracije u području pritiska i u području zatezanja sa aspekta relativnih odstupanja i proširenih mjernih nesigurnosti kod sila od 30 % do 100 % nominalnog područja, što je dovoljno da se etaloni kalibrišu ili u području pritiska ili u području zatezanja, a da se isti koriste za kalibraciju ispitnih uređaja za mjerenje sile i u području pritiska i u području zatezanja.
- Za mjerno područje od 20 kN do 500 kN Mehanički laboratorij procijenio je i eksperimentalno dokazao $CMC=0,12\%$. To je najveća proširena mjerna nesigurnost i uzeta je u obzir kod uvažavanja činjenice prekrivanja dva etalona u mjernom području od 50 kN do 200 kN.

Na osnovu provedenih obimnih istraživanja te eksperimentalnog rada utvrđeno je da, prema relativnim greškama, procijenjenim iz rezultata kalibracije, prenosni etaloni sile MGCplus-Z4/200 kN i MGCplus-Z4/500 kN se mogu klasificirati u klasu 00 u skladu sa BAS EN ISO 376:2005 za 30 % do 100 % nominalnog mjernog područja. Uzimajući u obzir vrijednost kalibracione mjerne mogućnosti referentnog etalona u iznosu od 0,05%, koji je jedan od kriterija za klasifikaciju, prenosni etaloni su klasificirani u klasu 1 za 10 % do 100 % kalibrisanog mjernog područja. Procijenjene relativne greške i mjerna nesigurnost referentnog etalona bile su osnova za kvantifikaciju standardnih doprinosa mjernoj nesigurnosti i procjenu kombinovane i proširene mjerne nesigurnosti. Na bazi proširenih mjernih nesigurnosti referentnih etalona i provedenog eksperimenta na kidalicama 20 SZBDA i 50 SZBDA procijenjena je kalibraciona mjerna mogućnost Mehaničkog laboratorija.

Rad pruža značajne podatke za referentne kalibracione laboratorije za silu pri identifikaciji relativnih grešaka i kvantifikaciji doprinosa mjernoj nesigurnosti kod procjene proširene mjerne nesigurnosti.

Takođe, kalibracionim laboratorijama, koje posjeduju prenosne etalone sile, rad pruža važne informacije o slijedećem:

- izboru optimalnog područja prenosnog etalona kada se koriste za kalibraciju uređaja za zadavanje sile,
- mogućnosti njihovog korištenja za kalibraciju i u području pritiska i u području zatezanja,
- procjeni kalibracione mjerne mogućnosti laboratorija,
- potrebi preklapanja mjernih područja prenosnih etalona kod procjene kalibracione mjerne mogućnosti laboratorija.

Takođe, rad pruža smjernice za dalja istraživanja u ovom pravcu, tj. proširivanje istraživanja na identifikaciju relativne greške puzanja kao osnove za kvantifikaciju relativne standardne nesigurnosti mjerne čelije vezano za puzanje.

LITERATURA

1. GUM: Guide to the Measurement of Force, The Institute of Measurement and Control, London, Originally published 1998., Reviewed and re-issued 2013.
2. Ž. Alar: Analiza uticajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera, doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
3. OIML: International Vocabulary of Terms in Legal Metrology, Edition 2000.
4. EAL-G12: Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards, 1995.
5. Metrology – in short 3rd edition, 2008.
6. BAS EN ISO/IEC 17025:2006: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
7. DKD-4: Rückführung von Meß-und Prüfmitteln auf nationale Normale, Herausgegeben von der Physikalisch – Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, Ausgabe 1., 1998.
8. http://www.met.gov.ba/mjerne_jedinice
9. International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, ISO VIM, 2004.
10. ASTM E-74/1995: Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines
11. <http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen>
12. A. Sawla: Uncertainty scope of the force calibration machines, Guidance for the determination of the best measurement capability of force calibration machines and uncertainty of calibration results of force measuring device, PTB-Mitteilungen 104 4/94
13. EAL-G22: Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements, EA European co-operation for Accreditation, Edition 1, 1996.
14. <http://www.gtm-gmbh.com/en/products/machines.html>
15. <http://www.foil-strain-gauge+photos>
16. <http://www.hbm.com/en/menu/products/strain-gages-accessories>
17. I. Vitez, M. Oruč, R. Sunulahpašić: Ispitivanje metalnih materijala – mehanička i tehnološka ispitivanja, Fakultet za metalurgiju i materijale, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2006.
18. N. Zaimović-Uzunović: Mjeriteljska infrastruktura, Mašinski fakultet u Zenici, Univerzitet u Sarajevu, Zenica, 2003.
19. DIN 51301/1986: Kraftmeßgeräte für statische Kräfte zur Prüfung von Werkstoffprüfmaschinen
20. BS EN 10002-3/1995: Tensile testing of metallic materials – Part 3. Calibration of force proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines
21. BAS EN ISO 376/2005: Metallic materials – Calibration of force proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines
22. H. Ličen, G. Wegener: Training course „Calibration of force and torque transducers“, Petrovaradin, 2009.
23. R. S. Figliola, D. E. Beasley: Theory and design for Mechanical Measurement, Fifth Edition, John Wiley&Sons, New York, 2011.
24. <http://www.google.ba/search?q=metoda+najmanjih+kvadrata+dijagram>

25. JCGM 100: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurements, First edition, 2008.
26. ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, Switzerland, First Edition, 1993.
27. N. Zaimović-Uzunović, S. Lemeš: Mjerenja i kvalitet, Politehnički fakultet, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2012.
28. N. Zaimović-Uzunović, S. Lemeš, D. Daut, A. Softić: Proizvodna mjerenja, Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2009.
29. O. Beganović: Ocjena mjerne nesigurnosti rezultata kalibracije uređaja za mjerenje sile i tvrdoće, Metalurški institut „Kemal Kapetanović“ Zenica, Zenica, 2002.
30. EA-4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, EA European co-operation for Accreditation, 1999.
31. PRAQ III Regional Programme on Quality Assurance: Training course: „Uncertainty calculation in metrology“, Sarajevo, 2000.
32. D. Dengel: Genauigkeit von Werkstoffprüfergebnissen, Materialprüfung 39-1997.
33. H. Kolbjørnsen, F. Langmead: Training course: «Uncertainty calculation – calibration», Norwegian Accreditation, Institut za akreditiranje BiH, 2011.
34. ISO/IEC Guide 98-3/1995: Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement
35. M. Breznišćak: Iskazivanje mjerne nesigurnosti, Mjeriteljski vjesnik 8-1990., str. 22.
36. EURAMET cg-04: Uncertainty of Force Measurements - Calibration Guide, European Association of National Metrology Institutes, Version 2.0, 2011.
37. http://www.bipm.org/utis/common/CIPM_MRA-D-04.pdf
38. 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
39. M. Oruč, R. Sunulahpašić, A. Gigović-Gekić: Menadžment kvaliteta, Fakultet za metalurgiju i materijale, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2013.
40. Operating manual: Force transducers Z4C4 with strain gauge measuring system, Hottinger Baldwin Messtechnik HBM Mess und Systemtechnik GmbH, Electrical measurement of mechanical quantities, 2000.

PRILOZI

PRILOG A

Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN

PRILOG B

Proračun CMC za mjerno područje od 100 kN do 500 kN

PRILOG A

Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN

Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN

Rezultati kalibracije u području pritiska

Vrijednosti signala kod nominalne sile u svim pozicijama prenosnog etalona, vrijednosti signala nakon rasterećenja i procijenjeno relativno odstupanje nula vrijednosti kod predopterećenja date su u tabeli A-1.

Tabela A-1. Izmjerene vrijednosti signala i relativno odstupanje nule kod predopterećenja, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

mV/V	0°			120°	240°
	I	II	III		
Nula signal	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Očitavanje kod nominalne vrijednosti	1,99934	1,99972	1,99966	1,99965	1,99968
Očitavanje nakon rasterećenja	-0,00027	0,00000	-0,00008	-0,00008	-0,00007
Procijenjeno relativno odstupanja nula vrijednosti, %	-0,013	0,000	-0,004	-0,004	-0,004

Izmjerene vrijednosti nula signala u mjernim serijama kod povećanja sile i u mjernim serijama kod smanjenja sile i relativno odstupanje nula vrijednosti date su u tabeli A-2.

Tabela A-2. Izmjerene vrijednosti i relativno odstupanje nule kod mjernih nizova, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

	X1	X2	X3/X4'	X5/X6'
Ostatak nakon rasterećenja, mV/V	-0,00009	-0,00009	-0,00006	-0,00004
Procijenjeno relativno odstupanja nula vrijednosti, %	-0,005	-0,005	-0,003	-0,002

U tabeli A-3. su prikazani rezultati kalibracije prenosnog etalona.

Tabela A-3. Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN - područje pritiska

Sila kN	Pozicija etalona 0° mV/V		Pozicija etalona 120° mV/V		Pozicija etalona 240° mV/V	
	X1	X2	X3	X4'	X5	X6'
0	0,00000	0,00000	0,00000	-	0,00000	-
50	0,20018	0,20016	0,20018	0,19985	0,20018	0,19987
100	0,40026	0,40024	0,40026	0,39985	0,40026	0,39989
150	0,60023	0,60024	0,60025	0,59980	0,60025	0,59983
200	0,80016	0,80016	0,80018	0,79973	0,80020	0,79975
250	1,00015	1,00015	1,00018	0,99974	1,00020	0,99977
300	1,20009	1,20009	1,20013	1,19973	1,20013	1,19974
350	1,39998	1,39998	1,40003	1,39968	1,40005	1,39971
400	1,59987	1,59988	1,59993	1,59964	1,59995	1,59967
450	1,79976	1,79977	1,79983	1,79963	1,79986	1,79967
500	1,99965	1,99966	1,99972	-	1,99976	-

U tabeli A-4. date su proračunate srednje vrijednosti izlaznog signala za poziciju mjerne ćelije 0^0 i srednja vrijednost izlaznog signala za pozicije mjerne ćelije 120^0 i 240^0 i vrijednosti relativnih odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze.

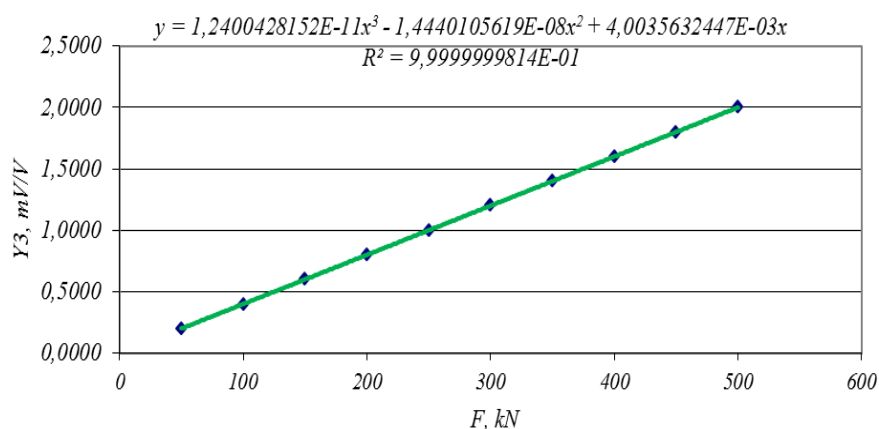
Tabela A-4. Relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Sila kN	Pozicija etalona 0^0		Pozicija etalona 120^0 i 240^0		Pozicija etalona 120^0 i 240^0
	$\bar{X}_{wr}, mV/V$	$b', \%$	$\bar{X}_r, mV/V$	$b, \%$	$v, \%$
0	-	-	-	-	-
50	0,20017	-0,010	0,20018	0,000	-0,162
100	0,40025	-0,005	0,40026	0,000	-0,098
150	0,60023	0,002	0,60024	0,003	-0,071
200	0,80016	0,000	0,80018	0,005	-0,055
250	1,00015	0,000	1,00017	0,005	-0,043
300	1,20009	0,000	1,20011	0,003	-0,032
350	1,39998	0,000	1,40002	0,005	-0,024
400	1,59987	0,001	1,59991	0,005	-0,018
450	1,79976	0,001	1,79981	0,006	-0,011
500	1,99965	0,001	1,99971	0,006	-

Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, slika A-1. data je jednačinom:

$$A=1,2400428152E-11; B=1,4440105619E-08; C=4,0035632447E-03$$

$$Xa=1,2400428152E-11 \cdot F^3 + 1,4440105619E-08 \cdot F^2 + 4,0035632447E-03 \cdot F$$

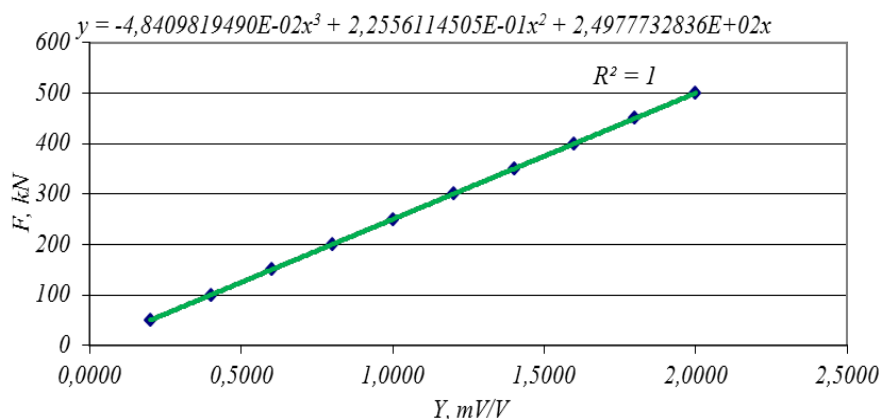


Slika A-1. Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/500 kN - područje pritiska

Za proračun vrijednosti sile F na temelju vrijednosti očitavanja izlaznog signala X urađena je inverzna jednačina interpolacije, slika A-2., u cilju dobijanja interpolirane vrijednosti za bilo koji iznos sile od 50 kN do 500 kN.

Inverzna jednačina interpolacije glasi:

$$F = -4,8409819490E-02 \cdot X^3 + 2,2556114505E-01 \cdot X^2 + 2,4977732836E+02 \cdot X$$



Slika A-2. Inverzna kriva interpolacije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/500 kN - područje pritiska

U tabeli A-5. date su vrijednosti izlaznog signala na temelju provedene interpolacije polinomom trećeg stepena u mjernom području od 50 kN do 500 kN sa korakom od 5 kN prema interpolacionoj jednačini.

Tabela A-5. Interpolirane vrijednosti prema interpolacionoj jednačini, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Sila, kN	0 kN	5 kN	10 kN	15 kN	20 kN
	mV/V				
50	0,20022	0,22024	0,24027	0,26030	0,28032
75	0,30035	0,32038	0,34041	0,36045	0,38048
100	0,40051	0,42055	0,44058	0,46062	0,48066
125	0,50070	0,52073	0,54077	0,56082	0,58086
150	0,60090	0,62095	0,64099	0,66104	0,68108
175	0,70113	0,72118	0,74123	0,76128	0,78134
200	0,80139	0,82144	0,84150	0,86156	0,88161
225	0,90167	0,92173	0,94180	0,96186	0,98192
250	1,00199	1,02205	1,04212	1,06219	1,08226
275	1,10233	1,12240	1,14248	1,16255	1,18263
300	1,20270	1,22278	1,24286	1,26294	1,28303
325	1,30311	1,32319	1,34328	1,36337	1,38346
350	1,40355	1,42364	1,44373	1,46383	1,48392
375	1,50402	1,52412	1,54422	1,56432	1,58442
400	1,60453	1,62464	1,64474	1,66485	1,68496
425	1,70507	1,72519	1,74530	1,76542	1,78554
450	1,80566	1,82578	1,84590	1,86603	1,88615
475	1,90628	1,92641	1,94654	1,96667	1,98681
500	2,00694	2,02708	2,04722	2,06736	2,08750

Kriteriji ocjenjivanja prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN - kalibracija u području pritiska

U tabeli A-6. dati su procijenjeni kriteriji za klasifikaciju iz rezultata kalibracije prenosnog etalona a na slici grafički su prikazane vrijednosti relativnih odstupanja u zavisnosti od vrijednosti sile.

Tabela A-6. Procijenjeni kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Sila kN	Relativna odstupanja, %					Klasa
	Ponovljivosti b'	Obnovljivosti b	Interpolacije f_c	Nule f_o	Histereze v	
50	-0,010	0,000	0,020	-0,005	-0,162	1
100	-0,005	0,000	0,010		-0,098	05
150	0,002	0,003	-0,002		-0,071	0,5
200	0,000	0,005	-0,007		-0,055	00
250	0,000	0,005	-0,001		-0,043	00
300	0,000	0,003	0,001		-0,032	00
350	0,000	0,005	0,001		-0,024	00
400	0,001	0,005	0,001		-0,018	00
450	0,001	0,006	0,000		-0,011	00
500	0,001	0,006	-0,001		-	00

Procjena standardnih nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN - područje pritiska

Kod procjene nesigurnosti prenosnog etalona uzeti su u obzir slijedeći doprinosi:

1. Doprinosi nesigurnosti koji se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije i karakteristika prenosnog etalona,
2. Doprinosi nesigurnosti od referentnog etalona, odnosno referentne mašine.

Doprinosi nesigurnosti koji se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije i karakteristika prenosnog etalona

Procijenjene vrijednosti standardnih nesigurnosti po kalibracionim tačkama i kombinovana standardna nesigurnost koja se može procijeniti iz rezultata kalibracije i karakteristika prenosnog etalona date su u tabeli A-7.

Tabela A-7. Standardne nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Sila, kN	Standardne nesigurnosti, %						u_{cpet} , %
	u_{f0} , %	u_{res} , %	u_{b1} , %	u_{b2} , %	u_{12} , %	u_{f2} , %	
50	0,00450	0,00144	-0,00288	0,00000	-0,04615	0,00408	0,046
100	0,00450	0,00072	-0,00144	0,00000	-0,02813	0,00204	0,028
150	0,00450	0,00048	0,00048	0,00203	-0,02092	-0,00041	0,021
200	0,00450	0,00036	0,00000	0,00250	-0,01623	-0,00143	0,017
250	0,00450	0,00029	0,00000	0,00257	-0,01255	-0,00020	0,013
300	0,00450	0,00024	0,00000	0,00203	-0,00950	0,00020	0,010
350	0,00450	0,00021	0,00000	0,00267	-0,00711	0,00020	0,008
400	0,00450	0,00018	0,00018	0,00271	-0,00514	0,00020	0,006
450	0,00450	0,00016	0,00016	0,00295	-0,00313	0,00000	0,004
500	0,00450	0,00014	0,00014	0,00286	-	-0,00020	0,003

Nesigurnost referentnog etalona

Nesigurnost referentnog etalona predstavlja kalibracionu mjernu mogućnost laboratorija i izražena je kao proširena nesigurnost sa normalnom raspodjelom (nivo povjerenja od 95 % i faktor prekrivanja $k=2$).

Proširena mjerna nesigurnost referentnog etalona GTM, na kojem je realizovana kalibracija prenosnog etalona je $U=0,05\%$.

Kombinovana mjerna nesigurnost prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Kombinovana mjerna nesigurnost prenosnog etalona procijenjena iz rezultata kalibracije u_{cpet} , nesigurnost referentnog etalona u_{ref} i standardna kombinovana nesigurnost prenosnog etalona u_c za sve kalibracione tačke date su u tabeli A-8.

Tabele A-8. Vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} , i u_c po kalibracionim tačkama, MGCplus-Z4/500kN- područje pritiska

Sila, kN	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
u_{cpet} , %	0,046	0,028	0,021	0,017	0,013	0,010	0,008	0,006	0,004	0,003
u_{ref} , %	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
u_c , %	0,053	0,038	0,033	0,030	0,028	0,027	0,026	0,026	0,025	0,025

Proširena mjerna nesigurnost prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Proširena mjerna nesigurnost ne sadrži nikakav doprinos u pogledu dugoročne nestabilnosti prenosnog etalona. Izmjerene vrijednosti su u okviru datog intervala sa vjerovatnoćom od 95%.

U tabeli A-9. data je klasifikacija etalona prema standardu BAS EN ISO 376:2005 i pripadajuća najmanja mjerna nesigurnost kalibracije po kalibracionim tačkama.

Tabela A-9. Klasifikacija etalona i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost, MGCplus-Z4/500 kN – područje pritiska

Sila, kN	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Klasa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U, %	0,106	0,075	0,065	0,060	0,056	0,054	0,052	0,051	0,051	0,050

Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN - područje zatezanja

Vrijednosti signala kod nominalne sile u svim pozicijama prenosnog etalona, vrijednosti signala nakon rasterećenja i procijenjeno relativno odstupanje nula vrijednosti kod predopterećenja date su u tabeli A-10.

Tabela A-10. Izmjerene vrijednosti signala i procijenjeno relativno odstupanje nule kod predopterećenja, MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

mV/V	0°			120°	240°
	I	II	III		
Nula signal	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Očitavanje kod nominalne vrijednosti	-1,99956	-1,99989	-1,99988	-1,99995	-1,99997
Očitavanje nakon rasterećenja	0,00018	0,00001	0,00002	-0,00003	-0,00003
Relativno odstupanje nula vrijednosti, %	-0,009	-0,001	-0,001	0,002	0,002

Izmjerene vrijednosti nula signala u mjernim nizovima kod povećanja sile i u mjernim nizovima kod smanjenja sile te procijenjeno relativno odstupanje nula vrijednosti dato je u tabeli A-11.

Tabela A-11. Izmjerene vrijednosti nula signala i relativno odstupanje nule kod mjernih nizova, MGCplus-Z4/500 kN-područje zatezanja

	X1	X2	X3/X4'	X5/X6'
Ostatak nakon rasterećenja, mV/V	0,00001	-0,00001	-0,00002	0,00003
Relativno odstupanje nula vrijednosti %	-0,001	0,001	-0,001	-0,002

U tabeli A-12. prikazani su rezultati kalibracije prenosnog etalona.

Tabela A-12. Rezultati kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

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	-
50	-0,19983	-0,19983	-0,19984	-0,19955	-0,19983	-0,19954
100	-0,39967	-0,39967	-0,39965	-0,39932	-0,39968	-0,39932
150	-0,59959	-0,59958	-0,59958	-0,59920	-0,59959	-0,59922
200	-0,79958	-0,79956	-0,79957	-0,79918	-0,79960	-0,79924
250	-0,99961	-0,99960	-0,99962	-0,99927	-0,99963	-0,99930
300	-1,19964	-1,19965	-1,19966	-1,19938	-1,19967	-1,19940
350	-1,39970	-1,39971	-1,39974	-1,39946	-1,39974	-1,39949
400	-1,59982	-1,59986	-1,59986	-1,59965	-1,59986	-1,59970
450	-1,79987	-1,79991	-1,79992	-1,79976	-1,79994	-1,79983
500	-2,00000	-2,00002	-2,00002	-	-2,00009	-

U tabeli A-13. date su proračunate srednje vrijednosti izlaznog signala za poziciju mjerne ćelije 0^0 i srednja vrijednost izlaznog signala za pozicije mjerne ćelije 120^0 i 240^0 i vrijednosti relativnog odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze.

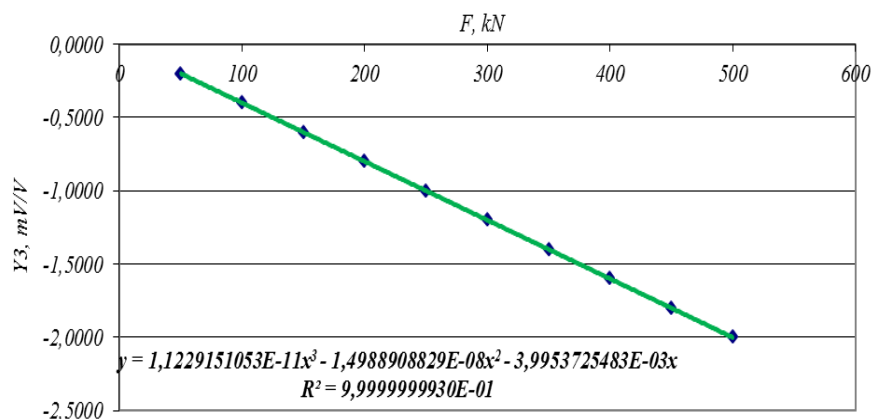
Tabela A-13. Relativna odstupanja ponovljivosti, obnovljivosti i histereze prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

Sila kN	Pozicija etalona 0^0		Pozicija etalona 120^0 i 240^0		Pozicija etalona 120^0 i 240^0
	$\bar{X}_{wr}$, mV/V	b' , %	$\bar{X}_r$, mV/V	b , %	v , %
0	-	-	-	-	-
50	-0,19983	0,000	-0,19983	-0,005	-0,145
100	-0,39967	0,000	-0,39967	-0,008	-0,087
150	-0,59959	-0,002	-0,59959	-0,002	-0,063
200	-0,79957	-0,003	-0,79958	-0,004	-0,047
250	-0,99961	-0,001	-0,99962	-0,002	-0,034
300	-1,19965	0,001	-1,19966	-0,003	-0,023
350	-1,39971	0,001	-1,39973	-0,003	-0,019
400	-1,59984	0,003	-1,59985	-0,003	-0,012
450	-1,79989	0,002	-1,79991	-0,004	-0,008
500	-2,00001	0,001	-2,00004	-0,004	-

Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, slika A-3. data je jednačinom:

$$Xa=1,1229151053E-11 \cdot F^3 - 1,4988908829E-08 \cdot F^2 - 3,9953725483E-03 \cdot F$$

$$A=1,1229151053E-11; B=-1,4988908829E-08; C=-3,9953725483E-03$$

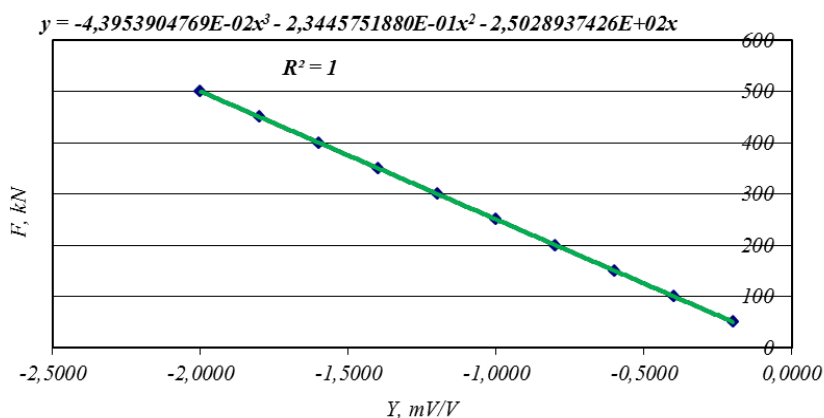


Slika A-3. Kriva kalibracije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/500 kN - područje zatezanja

Za proračun vrijednosti sile F na temelju vrijednosti očitavanja izlaznog signala X urađena je inverzna jednačina interpolacije, slika A-4., u cilju dobijanja interpolirane vrijednosti za bilo koji iznos sile od 50 kN do 500 kN.

Inverzna jednačina interpolacije glasi:

$$F = -4,3953904769E-02 \cdot X^3 - 2,3445751880E-01 \cdot X^2 - 2,5028937426E+02 \cdot X$$



Slika A-4. Inverzna kriva interpolacije opisana polinomom trećeg stepena, MGCplus-Z4/500 kN - područje zatezanja

U tabeli A-14. date su vrijednosti izlaznog signala na temelju provedene interpolacije polinomom trećeg stepena u mjernom području od 50 kN do 500 kN sa korakom od 5 kN prema interpolacionoj jednačini.

Tabela A-14. Interpolirane vrijednosti, MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

Sila, kN	0 kN	5 kN	10 kN	15 kN	20 kN
	mV/V				
50	-0,19980	-0,21979	-0,23977	-0,25976	-0,27975
75	-0,29973	-0,31972	-0,33971	-0,35970	-0,37969
100	-0,39968	-0,41967	-0,43966	-0,45965	-0,47964
125	-0,49963	-0,51963	-0,53962	-0,55962	-0,57961
150	-0,59961	-0,61960	-0,63960	-0,65959	-0,67959
175	-0,69959	-0,71959	-0,73959	-0,75958	-0,77958
200	-0,79958	-0,81958	-0,83959	-0,85959	-0,87959
225	-0,89959	-0,91959	-0,93959	-0,95960	-0,97960
250	-0,99960	-1,01961	-1,03961	-1,05962	-1,07962
275	-1,09963	-1,11963	-1,13964	-1,15964	-1,17965
300	-1,19966	-1,21966	-1,23967	-1,25968	-1,27969
325	-1,29969	-1,31970	-1,33971	-1,35972	-1,37973
350	-1,39974	-1,41974	-1,43975	-1,45976	-1,47977
375	-1,49978	-1,51979	-1,53980	-1,55981	-1,57982
400	-1,59983	-1,61984	-1,63985	-1,65986	-1,67987
425	-1,69988	-1,71989	-1,73990	-1,75991	-1,77992
450	-1,79993	-1,81994	-1,83995	-1,85996	-1,87997
475	-1,89998	-1,91999	-1,94000	-1,96001	-1,98002
500	-2,00003	-2,02004	-2,04005	-2,06006	-2,08007

Kriteriji ocjenjivanja prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN - kalibracija u području zatezanja

U tabeli A-15., iz rezultata kalibracije prenosnog etalona, procijenjeni su kriteriji za klasifikaciju i prenosni etalon je klasificiran prema standardu BAS EN ISO 376:2005.

Tabela A-15. Procijenjeni kriteriji za klasifikaciju prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

Sila kN	Relativna odstupanja, %					Klasa
	Ponovljivosti b'	Obnovljivosti b	Interpolacije f_c	Nule f_o	Histereze v	
50	0,000	-0,005	0,014	-0,002	-0,145	05
100	0,000	-0,008	-0,002		-0,087	05
150	-0,002	-0,002	-0,003		-0,063	00
200	-0,003	-0,004	0,000		-0,047	00
250	-0,001	-0,002	0,002		-0,034	00
300	0,001	-0,003	0,000		-0,023	00
350	0,001	-0,003	-0,001		-0,019	00
400	0,003	-0,003	0,001		-0,012	00
450	0,002	-0,004	-0,001		-0,008	00
500	0,001	-0,004	0,000		-	00

Procjena standardnih nesigurnosti kod kalibracije prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN - područje zatezanja

Doprinosi nesigurnosti koji se mogu procijeniti iz rezultata kalibracije i karakteristika prenosnog etalona dati su u tabeli A-16.

Tabela A-16. Standardne nesigurnosti koje su procijenjene iz rezultata kalibracije, MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

Sila, kN	Standardne nesigurnosti, %						u_{cpeb} %
	u_{f_o} %	u_{res} %	$u_{b'}$ %	$u_{b''}$ %	$u_{v'}$ %	u_{f_c} %	
50	-0,00043	-0,00144	0,00000	-0,00255	-0,04189	0,00293	0,042
100	-0,00043	-0,00072	0,00000	-0,00316	-0,02492	-0,00047	0,025
150	-0,00043	-0,00048	-0,00048	-0,00085	-0,01805	-0,00063	0,018
200	-0,00043	-0,00036	-0,00072	-0,00158	-0,01354	-0,00002	0,014
250	-0,00043	-0,00029	-0,00029	-0,00100	-0,00982	0,00032	0,010
300	-0,00043	-0,00024	0,00024	-0,00131	-0,00662	-0,00002	0,007
350	-0,00043	-0,00021	0,00021	-0,00174	-0,00547	-0,00012	0,006
400	-0,00043	-0,00018	0,00072	-0,00152	-0,00334	0,00023	0,004
450	-0,00043	-0,00016	0,00064	-0,00208	-0,00217	-0,00022	0,003
500	-0,00043	-0,00014	0,00029	-0,00220	-	0,00007	0,002

Nesigurnost referentnog etalona

Procijenjena nesigurnost referentnog etalona predstavlja kalibracionu mjernu mogućnost laboratorija i izražena je kao proširena nesigurnost sa normalnom raspodjelom (nivo povjerenja od 95 % i faktor prekrivanja $k=2$).

Proširena mjerna nesigurnost referentnog etalona GTM, na kojem je realizovana kalibracija prenosnog etalona je $U=0,05\%$.

Kombinovana mjerna nesigurnost prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

Kombinovana mjerna nesigurnost prenosnog etalona proistekla iz rezultata kalibracije u_{cpet} , nesigurnost referentnog etalona u_{ref} i standardna kombinovana nesigurnost prenosnog etalona u_c za sve kalibracione tačke date su u tabeli A-17.

Tabele A-17. Vrijednosti u_{cpet} , u_{ref} i u_c po pojedinim kalibracionim tačkama, MGCplus-Z4/500 kN-područje zatezanja

Sila, kN	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
u_{cpet} , %	0,042	0,025	0,018	0,014	0,010	0,007	0,006	0,004	0,003	0,002
u_{ref} , %	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
u_c , %	0,049	0,035	0,031	0,028	0,027	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025

Proširena mjerna nesigurnost prenosnog etalona MGCplus-Z4/500 kN – područje zatezanja

U tabeli A-18. data je klasifikacija etalona prema standardu BAS EN ISO 376:2005 i pripadajuća proširena mjerna nesigurnost kalibracije po kalibracionim tačkama.

Tabela A-18. Klasifikacija etalona i pripadajuća proširena mjerna nesigurnost

Sila, kN	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Klasa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U , %	0,098	0,071	0,062	0,057	0,054	0,052	0,051	0,051	0,050	0,050

PRILOG B

**Proračun CMC za mjerno područje
od 100 kN do 500 kN**

Proračun CMC za mjerno područje od 100 kN do 500 kN

U tabeli B-1. su prikazani rezultati kalibracije analogne skale kidalice 50 SZBDA i procijenjene relativne greške u mjernom području od 100 kN do 500 kN.

Tabela B-1. Rezultati kalibracije analogne skale kidalice 50 SZBDA

Opterećenje, kN						Relativne greške, %			
Stvarno	Indicirano na analognoj skali								
	0^0		120^0	240^0		q	b'	ν	res
	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

Sve procijenjene relativne greške iz rezultata kalibracije analogne skale kidalice nalaze se u dozvoljenim granicama za klasu 1 prema standardu BAS EN ISO 7500-1:2004.

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 B-2.

Tabela B-2. Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost – analogna skala kidalice 50 SZBDA

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

Tabela B-3. Rezultati kalibracije pokazivanja softvera – pokazivanje softvera kidalice 50 SZBDA

Opterećenje, <i>kN</i>					Relativne greške, %			
Stvarno	Indicirano na softveru							
	<i>0⁰</i>	<i>120⁰</i>	<i>240⁰</i>		<i>q</i>	<i>b'</i>	<i>ν</i>	<i>res</i>
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 kidalice i standardne nesigurnosti koje se mogu procijeniti iz karakteristika prenosnog etalona, kombinovana, odnosno proširena mjerna nesigurnost po kalibracionim tačkama data je u tabeli B-4.

Tabela B-4. Procijenjene standardne, kombinovana i proširena nesigurnost - pokazivanje softvera kidalice 50 SZBDA

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	2	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		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

$u_{ze}=0,011\%$