Mr Vida Živković,
dipl. fiz.

Slobodan Zelenika,
dipl. fiz.

Savezni zavod za mere
i dragocene metale,
Beograd

Vojislav Đurašinović,
potpukovnik, dipl. inž.
Odeljenje za standardizaciju,
metrologiju i nomenklaturu,
SMO, Beograd

MOGUĆNOST MERENJA DUŽINE U METROLOŠKOM SISTEMU JUGOSLAVIJE NA OSNOVU REZULTATA SEDMOG CIKLUSA UPOREDNIH MERENJA ETALONA

UDC: 531.711/.713(497.1)

Rezime:

U radu su prikazani principi i metode po kojima se izvode uporedna merenja kao analiza rezultata sedmog ciklusa uporednih merenja etalon-graničnih planparalelnih mera dužine i etalon valjka. U analizi rezultata istaknuti su problemi u vezi sa primenom metode merenja, obradom i prikazivanjem rezultata, a posebno merne nesigurnosti. Prikazana je, takođe, funkcionalna zavisnost reproduktivnosti (merne nesigurnosti) od vrednosti merene dužine graničnih mera, odnosno mogućnost merenja dužine do 100 mm u metrološkom sistemu Jugoslavije.

Ključne reči: uporedna merenja, granična mera, etalon-valjak, srednja dužina, merna nesigurnost, ponovljivost, reproduktivnost, elektronski komparator, laserski interferometar, postupak iteracije.

LENGTH MEASUREMENT POSSIBILITY IN METROLOGY SYSTEM OF SR YUGOSLAVIA BASED ON THE RESULTS OF THE SEVENTH STANDARDS INTERCOMPARISON MEASUREMENT

Summary:

This article describes principles and methods of intercomparison measurement (Round-Robin), as well as the results and analysis of the seventh intercomparison measurement of standard length gauge blocks and standard cylinder in Yugoslavia. The analysis emphasises the problem of correct application of used measurement methods, elaboration and presentation of results, and especially of their uncertainty. In the article the function dependence of reproducibility (uncertainty) and measured length of gauge blocks is given; and therefore the length measurement possibility in range of 100 mm in Metrology System of Yugoslavia based on the seventh intercomparison measurement.

Key words: intercomparison (Round-Robin) measurement, gauge block, standard cylinder, mean length, measurement uncertainty, repeatability, reproducibility, electronic gauge block comparator, laser interferometer, iteration procedure.

Uvod

Jedna od značajnih aktivnosti u okviru metrološkog sistema Jugoslavije jeste organizovanje i sprovođenje uporednih merenja etalona i etalonskih sistema svih zainteresovanih laboratorija [1]. Dobro pripremljena i

sprovedena uporedna merenja daju značajan doprinos uspostavljanju merenog jedinstva i poboljšanju tačnosti merenja određene fizičke veličine.

Upoređivanja među laboratorijama u zemlji najefikasniji su put ka otkrivanju određenih sistematskih grešaka. Ona omogućavaju proveru mer-

ne opreme i mogućnosti merenja laboratorija, proveru određene metode merenja, uspostavljanje jedinstvene vrednosti upoređivanog etalona i otvaraju nove puteve razvoja i unapređenja rada u laboratorijama. Laboratorije učesnice uporednih merenja su ovlašćene laboratorije iz metrološkog sistema.

Osnovni zadaci uporednih merenja ovlašćenih laboratorija su:

- upotpunjavanje i obrazovanje kompatibilnog, jedinstvenog sistema ovlašćenih i drugih laboratorija u zemlji;

- unificiranje, standardizovanje i sistematizovanje metoda merenja, načina određivanja i prikazivanja rezultata merenja, izmerenih vrednosti i merne nesigurnosti [2] i, na taj način, unificiranje metrološkog kvaliteta merila;

- obezbeđenje tačne mere i merenog jedinstva.

U toku 1995. godine u SR Jugoslaviji je organizovan i sproveden sedmi ciklus uporednih merenja etalon-graničnih planparalelnih mera dužine i etalon-valjka. Organizatori i nosioci ovih merenja bili su Savezni zavod za mere i dragocene metale (Zavod) i Odeljenje za standardizaciju, metrologiju i nomenklaturu iz Saveznog ministarstva za odbranu. U ovom ciklusu uporednih merenja, pored Zavoda (SZM), učestvovalo je 16 metroloških laboratorija koje je ovlastio Zavod ili pomoćnik saveznog ministra za odbranu. Zajedno sa laboratorijama učesnicama merenja utvrđena su i usvojena Pravila uporednih merenja etalon-graničnih planparalelnih mera i etalon-valjka u sedmom ciklusu [4], koja sadrže:

- spisak laboratorija koje učestvuju u merenju;

- nosioce posla;

- etalone koji će se meriti, način i metode merenja;

- vreme potrebno za merenje i obradu mernih rezultata;

- redosled merenja i način priopredaje etalona;

- način sređivanja i dostavljanja rezultata;

- analizu rezultata i organizacije završnog sastanka na kome će se oni prikazati i analizirati.

Cilj uporednih merenja bio je:

- proveru opreme i mogućnosti laboratorija učesnica merenja;

- otkrivanje određenih sistematskih grešaka u radu;

- uspostavljanje jedinstvene mogućnosti merenja dužine do 100 mm sistema ovlašćenih laboratorija u našoj zemlji.

Osnovni principi i metode uporednih merenja

U sedmom ciklusu uporednih merenja, pored Zavoda, učestvovalo je 16 laboratorija. Merenja su obavljena prema usvojenim pravilima [4].

Predmet uporednih merenja bili su sledeći etaloni:

- granična planparalelna mera nazivne dužine 2 mm, proizvođača C.E.J, klase 00, serijskog broja 551079;

- granična planparalelna mera nazivne dužine 100 mm, proizvođača C.E.J, klase 00, serijskog broja 551079;

- etalon valjak nazivnog prečnika 50 mm, proizvođača SIP, serijskog broja 13982.

Svaka laboratorija učesnica merila je [6] odstupanje stvarne od nazivne vrednosti, odnosno srednju dužinu graničnih planparalelnih mera od 2 mm i 100 mm, i stvarnu vrednost dva uzajamno normalna prečnika etalon-valjka čiji su pravci naznačeni na etalonu i koji su mereni na polovini visine merne površine etalona.

Srednja dužina granične mere merena je metodom upoređenja sa sopstvenim etalom iste nazivne dužine, uz upotrebu uređaja za pregled granič-

nih mera — komparatora kontaktnog tipa, i određena je prema sledećem izrazu [6]:

$$L = L_e + \Delta L + [\alpha(20 - t) - \alpha_e(20 - t_e)] \cdot L_n \quad (1)$$

gde je:

- L — srednja dužina ispitivane granične mere,
- L_e — srednja dužina etalona izmerena interferometrijskom metodom,
- ΔL — srednja vrednost izmerene razlike dužine etalona i ispitivane granične mere na komparatoru, dobijena na osnovu 10 ponovljenih merenja,
- α i α_e — koeficijenti linearnog istežanja ispitivane granične mere i etalona,
- t i t_e — temperature ispitivane granične mere i etalona,
- L_n — nazivna dužina granične mere.

Etalon valjak meren je metodom direktnog upoređenja na odgovarajućem uređaju (merna mašina, mikroskop i sl.). Na osnovu 10 ponovljenih merenja određena je srednja vrednost svakog od dva uzajamno normalna prečnika etalon-valjka.

Srednja vrednost dužine granične mere, odnosno prečnika etalon-valjka, izračunava se na osnovu izraza:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

gde je:

- $n=10$ — broj ponovljenih merenja,
- y_i — pojedinačna vrednost merenja.

Srednja vrednost dobijena na osnovu ovog izraza vredi samo ako su ispunjeni sledeći uslovi: temperatura ispitivane i etalon-granične mere iste su i iznose 20°C , ispitivana i etalon-granična mera od istog su materijala,

a sva merenja obavljena su u istim uslovima u kratkom vremenskom intervalu.

Pored srednje vrednosti, laboratorije su izračunale i standardnu devijaciju kojom je ta vrednost određena. Standardna devijacija izračunata je na osnovu izraza [4]:

$$\bar{S}_y = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Statistički model obrade rezultata uporednih merenja

Statistička obrada rezultata uporednih merenja urađena je na osnovu modela preporučenog u međunarodnom standardu ISO 5725 [3] i BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP i OIML publikacije [5].

Na osnovu ovog modela pretpostavlja se da se svaki rezultat merenja — y može predstaviti u obliku

$$y = m + B + e \quad (4)$$

gde je:

- y — rezultat merenja,
- m — srednja vrednost,
- B — član koji se odnosi na odstupanje rezultata merenja pojedinih laboratorija od srednje vrednosti — m ,
- e — slučajna greška koja se javlja pri svakom merenju.

Srednja vrednost — m razlikuje se u opštem slučaju, od »stvarne vrednosti« — M , odnosno vrednosti dobijene nekom tačnijom metodom merenja. U ovim uporednim merenjima, na primer, vrednost m koja predstavlja dužinu granične planparalelne mere, u pojedinim laboratorijama dobijena je metodom upoređenja dužine ispitivane mere sa poznatom dužinom etalonske mere pomoću elektronskog komparatora, a »stvarna vrednost« — M merena je u Zavodu pomoću interferometra.

Vrednost člana B uzima se konstantnom za bilo koju seriju merenja izvršenih u pojedinoj laboratoriji. U međulaboratorijskim uslovima merenja član B se ponaša kao slučajna promenljiva koja ima približno normalnu raspodelu. Njena varijansa označava se sa:

$$\text{var (B)} = \sigma_L^2, \quad (5)$$

i naziva se međulaboratorijska varijansa. U opštem slučaju, ona se sastoji od dve komponente: slučajne i sistemske. Sistematska komponenta može da postoji ukoliko se merenja izvode sa različitim tipovima uređaja ili u različitim mikroklimatskim uslovima u laboratoriji. Ukoliko laboratorije koriste isti tip uređaja u sličnim mikroklimatskim uslovima, ova komponenta može se smatrati dovoljno malom, tako da se član B može razmatrati kao slučajna promenljiva.

Član e predstavlja slučajnu grešku koja se javlja prilikom svakog merenja. Kao i za član B pretpostavlja se da je njegova raspodela normalna, a varijansa povezana sa ovim članom je

$$\text{var (e)} = \sigma_w^2, \quad (6)$$

i naziva se unutarlaboratorijska varijansa. Ona može da se razlikuje, što zavisi od kvaliteta upotrebljene merne opreme ili stručnosti onoga koji vrši merenja u laboratoriji. U analizi rezultata uporednih merenja pretpostavljeno je da je metoda merenja standardizovana, tako da su razlike među laboratorijama dovoljno male.

Na osnovu modela dobijaju se vrednosti za ponovljivost — r i reproduktivnost — R prema izrazima:

$$r = 2,8 \sigma_r \quad (7)$$

$$R = 2,8 \sigma_R \quad (8)$$

gde je:

σ_r — varijansa ponovljivosti koja predstavlja srednju vrednost varijansi, dobijenih u pojedinim laboratorijama učesnicama uporednih merenja $\sigma_r^2 = \text{var}(e)$,

σ_R — varijansa koja služi za izračunavanje reproduktivnosti (varijansa reproduktivnosti),

$$\sigma_R^2 = \sigma_L^2 + \sigma_r^2 \quad (9)$$

Konstanta 2,8 podrazumeva da su ponovljivost i reproduktivnost procenjeni za nivo verovatnoće od 95%, kao i pretpostavku da je raspodela rezultata merenja približno normalna (u nju je uračunato neznatno odstupanje raspodele rezultata merenja od normalne raspodele) [3].

Budući da stvarne vrednosti varijansi σ_R^2 i σ_r^2 nisu poznate, u obradi rezultata merenja koriste se njihove procenjene vrednosti s_R^2 i s_r^2 dobijene na osnovu izvršenih uporednih merenja.

Izrazi koji se koriste u analizi rezultata uporednih merenja su sledeći:

$$T_1 = \sum_i \bar{y}_i \quad (10)$$

gde je y_i srednja vrednost merena u pojedinačnim laboratorijama;

$$T_2 = \sum_i \bar{y}_i^2, \quad (11)$$

$$T_3 = \sum_i s_i^2 \quad (12)$$

gde je s_i standardno odstupanje sa kojim su dobijene vrednosti $\bar{y}_i$.

Na osnovu ovih vrednosti izračunato je:

$$s_r^2 = \frac{T_3}{p}, \quad (13)$$

srednja unutarlaboratorijska varijansa (varijansa ponovljivosti),

$$s_L^2 = \frac{pT_2 - T_1^2}{p(p-1)} - \frac{s_r^2}{n}, \quad (14)$$

međulaboratorijska varijansa,

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2, \quad (15)$$

varijansa koja služi za izračunavanje reproduktivnosti R,

$$m = \frac{T_1}{p}, \quad (16)$$

srednja vrednost rezultata merenja svih laboratorija,

$$r = 2,8 \sqrt{s_r^2}, \quad (17)$$

ponovljivost rezultata merenja,

$$R = 2,8 \sqrt{s_R^2}, \quad (18)$$

reproduktivnost rezultata merenja

gde je:

p — broj laboratorija čiji su rezultati analizirani,

n — broj ponovljenih merenja.

Da bi se utvrdilo koji su rezultati merenja nekompatibilni (rezultati koje laboratorija treba da izuzme iz statističke analize) korišćeni su Kohranov (Cochran) i Diksonov (Dixon) kriterijum [3].

Kako pokazuje praksa, podaci o mernoj nesigurnosti rezultata merenja (dobijeni na osnovu procenjene standardne devijacije, odnosno varijanse) [2, 5] mogu se ponekad znatno razlikovati. Da bi se odredilo koje su vrednosti merne nesigurnosti u nekom ciklusu uporednih merenja prihvatljive i mogu se upotrebiti u statističkoj analizi rezultata uporednih merenja, primenjuje se Kohranov kriterijum maksimalnih varijansi. Ovaj kriterijum je neosetljiv na male vrednosti varijanse, koje su često rezultat pogrešne analize i procene, a ne visokih mernih mogućnosti neke laboratorije. Na osnovu ovog kriterijuma može se zaključiti da pojedine laboratorije mere sa manjom tačnošću od drugih, što je uslovljeno nekorektnom primenom metode merenja ili primenom neadekvatnog mernog uređaja. Postoje i drugi slični statistički testovi za analizu podataka o mernoj nesigurnosti, dobijenih u upo-

rednim merenjima [7], ali se jedino Kohranov kriterijum primenjuje na slučaj kada je neka od varijansi jednaka nuli.

Za analizu srednjih vrednosti, dobijenih merenjima u pojedinim laboratorijama, primenjuje se Diksonov kriterijum. On se primenjuje nakon Kohranovog kriterijuma na preostale rezultate merenja laboratorija učesnica uporednih merenja. Njegovom primenom dolazi se do podatka o tome koje rezultate uporednih merenja (srednje vrednosti merene veličine dobijene u pojedinim laboratorijama) ne treba uključiti u statističku obradu.

Rezultati uporednih merenja

Uporedna merenja u sedmom ciklusu obavljena su u periodu od 13. marta do 10. jula 1995. godine.

U tabeli 1 prikazani su etaloni i merna oprema korišćena u pojedinačnim laboratorijama pri uporednim merenjima etalon-graničnih planparalelnih mera dužine i etalon-valjka.

Pri merenju graničnih planparalelnih mera od 2 mm i 100 mm dve laboratorije učesnice koristile su komparator čija je rezolucija za red veličine manja od ostalih (Abbeov visinomer i optimetar Carl Zeiss), a pet laboratorija je kao sopstvene etalone koristilo granične mere klase 0, dok su ostale upotrebile granične mere klase 00.

Etalon-valjak laboratorije učesnice su merile različitim uređajima; merenu mašinu je koristilo deset laboratorija, merni mikroskop tri, optimetar jedna i elektronski komparator dve laboratorije. Sedam laboratorija merilo je valjak upoređenjem sa sopstvenim etalon-valjkom ili graničnom planparalelnom merom od 50 mm, dok su ostale (osam) direktno merile vrednost prečnika ispitivanog valjka.

Etaloni i merna oprema	Metrološke laboratorije — učesnice merenja																
	SZM	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16
Etalon-granične planparalelne mere																	
Interferometar CARL ZEISS	◆																
Elektronski komparator MAHR		◆		◆			◆		◆	◆							◆
Elektronski komparator TESA					◆	◆					◆	◆				◆	
Elektronski komparator SUHL															◆		
ABBE-ov visinomer													◆				
Optimetar CARL ZEISS														◆			
Etalon g.p.m, 00, Cary		◆															
Etalon g.p.m, 00, Messwelk				◆													
Etalon g.p.m, 00, Mauser					◆												
Etalon g.p.m, 00, C.E.J.						◆				◆	◆		◆			◆	
Etalon g.p.m, 00, C. Frank															◆		
Etalon g.p.m, 0, Kirov							◆										
Etalon g.p.m, 0, Carl Zeiss									◆			◆		◆			
Etalon g.p.m, 0, Helios																	◆
Etalon valjak																	
Laserski interferometar HP	◆																
Merna mašina Mahr		◆									◆						
Merna mašina Carl Zeiss			◆	◆	◆			◆		◆						◆	
Merna mašina SIP							◆		◆								
Alatni mikroskop OMO						◆											
Alatni mikroskop C. Zeiss								◆									
Dvokoordinatni mikroskop C. Zeiss													◆				
Optimetar Carl Zeiss														◆			
Elektronski komparator MAHR															◆		◆
Etalon p.g.m, kl. 0,50 mm			◆											◆	◆		◆
Etalon p.g.m, kl. 1,50 mm		◆															
Etalon valjak, SIP, 50 mm						◆		◆									

Tabela 2

Laboratorija	Granična mera 2 mm		Granična mera 100 mm	
	Srednja vrednost (μm)	Standardna devijacija (μm)	Srednja vrednost (μm)	Standardna devijacija (μm)
1	2	3	4	5
SZM	-0,020	0,004	+0,151	0,014
L1	-0,055	0,003	+0,228	0,003
L2	—	—	—	—
L3	-0,051	0,004	+0,250	0,003
L4	-0,047	0,002	+0,093	0,003
L5	-0,055	0,002	+0,264	0,002
L6	-0,041	0,003	+0,121	0,003
L7	—	—	—	—
L8	-0,049	0,002	+0,265	0,012
L9	+0,001	0,001	+0,356	0,338
L10	-0,045	0,002	+0,189	0,002
L11	-0,077	0,005	+0,200	0,008
L12	-0,05	0,1	+0,15	0,1
L13	0,00	0,1	+0,50	0,1
L14	-0,034	0,003	+0,132	0,006
L15	-0,024	0,002	-0,042	0,003
L16	-0,080	0,006	+0,240	0,016
SZM	-0,24	0,004	+0,145	0,014

Tabela 3

Laboratorija	Etalon-valjak prečnik A		Etalon-valjak prečnik B	
	Srednja vrednost (μm)	Standardna devijacija (μm)	Srednja vrednost (μm)	Standardna devijacija (μm)
1	2	3	4	5
SZM	+0,14	0,09	+0,4	0,09
L1	+0,64	0,02	+1,35	0,02
L2	+0,19	0,15	+1,38	0,15
L3	+0,96	0,05	+1,30	0,04
L4	+0,17	0,04	+1,00	0,03
L5	+0,48	0,01	+0,97	0,01
L6	+0,35	0,02	+1,05	0,02
L7	+0,30	0,15	+1,60	0,34
L8	−0,16	0,02	+0,14	0,02
L9	+0,95	0,09	+1,40	0,13
L10	+0,02	0,04	+0,71	0,04
L11	—	—	—	—
L12	+0,10	0,10	+0,90	0,10
L13	+0,35	0,10	+1,07	0,10
L14	+0,44	0,02	+1,28	0,03
L15	+0,11	0,02	+0,16	0,02
L16	+0,07	0,02	+0,37	0,02
SZM	+0,15	0,09	+0,58	0,09

U tabelama 2 i 3 prikazane su srednje vrednosti — m i standardne devijacije — s merenja etalon-graničnih planparalelnih mera od 2 mm i 100

mm, i merenja etalon valjka prečnika 50 mm za sve laboratorije.

Na slikama 1, 2, 3 i 4 prikazani su grafički rezultati uporednih merenja navedenih etalona.

Sl. 1 — Rezultati merenja etalon-granične mere od 2 mm

Sl. 2 — Rezultati merenja etalon-granične mere od 100 mm

Sl. 3 — Rezultati merenja prečnika A etalon-valjka

Sl. 4 — Rezultati merenja prečnika B etalon-valjka

Analiza rezultata uporednih merenja

Na slici 5 prikazan je opšti dijagram toka statističke analize rezultata uporednih merenja korišćenjem statističkog modela preporučenog u standardu ISO 5725 [3]. Osenčena polja na dijagramu odgovaraju analizi rezultata merenja etalon-graničnih mera dužine i etalon-valjka merenih u sedmom ciklusu uporednih merenja.

U tabeli 4 dati su parametri T_1 , T_2 , T_3 , s_r^2 , s_L^2 , s_R^2 , m , r i R i njihove izračunate vrednosti na osnovu podataka iz tabele 2 i tabele 3. Pri proračunu je uzet model koji se primenjuje u slučaju uporednih merenja sa jednakim brojem ponovljenih merenja u svakoj

laboratoriji, i koji je veći od 2 (broj ponovljenih merenja za sve laboratorije je 10).

Analiza rezultata uporednih merenja, dobijenih na osnovu ovih proračuna, pokazala je za:

— etalon-graničnu planparalelnu meru od 2 mm: statistički su obrađivani svi rezultati merenja, osim rezultata dve laboratorije koje su za merenje koristile komparator sa manjom rezolucijom za red veličine od ostalih laboratorija. U toku obrade nisu korišćeni Diksonov i Kohranov kriterijum za odbacivanje nekompatibilnih rezultata merenja (outliers/ stragglers). Dobijena je srednja vrednost odstupanja od nazivne vrednosti $m = -0,047 \mu\text{m}$ sa reproduktivnošću $R = 0,07 \mu\text{m}$. Ponovljivost merenja unutar svake la-

Tabela 4

	Granična mera 2 mm	Granična mera 100 mm	Etalon-valjak	
			Prečnik A	Prečnik B
Br. laborat. učes.: p Br. ponov. merenja: n	$p=12$ $n=10$	$p=12$ $n=10$	$p=15$ $n=10$	$p=15$ $n=10$
$T_1 = \sum \bar{y}_i$ (μm)	-0,56	2,30	4,97	14,68
$T_2 = \sum \bar{y}_i^2$ (μm^2)	0,0315	0,5569	3,1122	17,2598
$T_3 = \sum s_i^2$ (μm^2)	0,001218	0,151380	0,080427	0,182219
$s_r^2 = \frac{T_3}{p}$ (μm^2)	0,000102	0,012615	0,005362	0,012148
$s_L^2 = \frac{pT_2 - T_1^2}{p(p-1)} - \frac{s_r^2}{n}$ (μm^2)	0,000478	0,009433	0,103954	0,205426
$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2$ (μm^2)	0,000580	0,022048	0,109315	0,217574
$m = \frac{T_1}{p}$ (μm)	-0,047	+0,191	+0,33	+0,98
$r = 2,8 \sqrt{s_r^2}$ (μm)	0,03	0,31	0,21	0,31
$R = 2,8 \sqrt{s_R^2}$ (μm)	0,07	0,42	0,93	1,31

Sl. 5 — Dijagram toka statističke analize rezultata uporednih merenja

laboratorije iznosi $r = 0,03 \mu\text{m}$. Odstupanje ovako dobijene srednje vrednosti m od stvarne vrednosti ($M = -0,022 \mu\text{m}$), izmerene na interferometru u Zavodu, iznosi $\Delta m = m - M = -0,025 \mu\text{m}$, što je u okviru nesigurnosti merenja elektronskog komparatora $\pm (0,05 + 0,5 \cdot L) \mu\text{m}$;

— etalon graničnu planparalelnu meru od 100 mm:

u statističku obradu uzeti su svi rezultati merenja osim rezultata dve laboratorije koje su za merenje koristile komparator sa manjom rezolucijom od ostalih. U toku obrade nisu korišćeni Diksonov i Kohranov kriterijum za odbacivanje nekompatibilnih rezultata merenja (outliers/ stragglers). Dobijena je srednja vrednost odstupanja od nazivne vrednosti, $m = +0,191 \mu\text{m}$ sa reproduktivnošću $R = 0,42 \mu\text{m}$. Ponovljivost merenja unutar svake laboratorije iznosi $r = 0,31 \mu\text{m}$. Odstupanje ovako dobijene srednje vrednosti m od stvarne vrednosti ($M = +0,150 \mu\text{m}$), izmerene na interferometru iznosi $\Delta m = m - M = +0,041 \mu\text{m}$, što je u okviru nesigurnosti merenja elektronskog komparatora $\pm (0,05 + 0,5 \cdot L) \mu\text{m}$, ali vrednost dobijena za reproduktivnost, koja karakteriše rasipanje rezultata čitavog sistema laboratorija koje su učestvovala u uporednim merenjima znatno je veća od dozvoljene vrednosti ($\pm 0,1 \mu\text{m}$ za 100 mm, a dobijeno je $\pm 0,21 \mu\text{m}$).

— etalon-valjak prečnika 50 mm:

u statističku obradu uzeti su svi rezultati merenja. U toku obrade nisu korišćeni Diksonov i Kohranov kriterijum za odbacivanje nekompatibilnih rezultata merenja (outliers/ stragglers). Dobijena je srednja vrednost odstupanja od nazivne vrednosti za prečnik A: $m = +0,33 \mu\text{m}$ sa reproduktivnošću $R = 0,93 \mu\text{m}$, a za prečnik B: $m = +0,98 \mu\text{m}$ sa reproduktivnošću $R = 1,31 \mu\text{m}$. Ponovljivost merenja unutar svake laboratorije iznosi $r = 0,21 \mu\text{m}$ za prečnik A i $r = 0,31 \mu\text{m}$ za prečnik B. Odstupanje ovako dobijene srednje vrednosti m od stvarne vrednosti ($M = +0,15$

μm), izmerene laserskim interferometrom u Zavodu, iznosi, $\Delta m = m - M = +0,18 \mu\text{m}$, za prečnik A, i $M = +0,49 \mu\text{m}$, a $\Delta m = m - M = +0,49 \mu\text{m}$, za prečnik B.

Određivanje zavisnosti R od m

Drugi korak u analizi rezultata sedmog ciklusa uporednih merenja etalona dužine bilo je utvrđivanje funkcionalne zavisnosti između reproduktivnosti merenja R i srednje vrednosti m (za granične planparalelne mere). Polazeći od pretpostavke da je ta zavisnost linearna [3] i da se može prikazati relacijom $R = a + b \cdot m$ (linearna regresija), izračunate su najpre sledeće međuvrednosti:

$$Q_1 = \sum_j W_j \quad (19)$$

gde je $W_j = 1/R_j^2$, a j je broj merenih vrednosti (u slučaju ovih merenja $j = 2$, jer su merene dve vrednosti dužine od 2 mm i 100 mm);

$$Q_2 = \sum_j m_j W_j \quad (20)$$

$$Q_3 = \sum_j W_j m_j^2 \quad (21)$$

$$Q_4 = \sum_j W_j R_j \quad (22)$$

$$Q_5 = \sum_j W_j m_j R_j \quad (23)$$

Ove vrednosti korišćene su za izračunavanje parametara a i b pomoću sledećih izraza:

$$a = \frac{Q_3 Q_4 - Q_2 Q_5}{Q_1 Q_3 - Q_2^2} \quad (24)$$

$$b = \frac{Q_1 Q_5 - Q_2 Q_4}{Q_1 Q_3 - Q_2^2} \quad (25)$$

Nakon toga primenjen je postupak iteracije za podešavanje (fitovanje) vrednosti parametara a i b kako bi se dobila konačna zavisnost reproduktiv-

nosti od izmerene dužine. Ovaj postupak sastoji se u uzastopnom izračunavanju a_n i b_n pomoću izraza:

$$W_{nj} = \frac{1}{R_{nj}^2} \quad (26)$$

Na osnovu ovako dobijenih vrednosti za koeficijente a_n i b_n uspostavlja se nova funkcionalna zavisnost $R_{nj} = a_n + b_n \cdot m_i$. Ovaj postupak se završava kada se postigne odgovarajuća tačnost koeficijenata a i b , odnosno funkcionalne zavisnosti između R i m . U navedenom postupku iteracije indeks n predstavlja broj uzastopnih iteracija.

Na osnovu statističke analize uporednih merenja etalon-graničnih planparalelnih mera, i na osnovu procedure predložene u standardu ISO 5725, određena je zavisnost reproduktivnos-

ti ovih merenja u funkciji merene vrednosti za opseg do 100 mm za celokupan sistem ovlašćenih laboratorija u SR Jugoslaviji. Dobijena je sledeća zavisnost:

$$R = \pm (0,031 + 1,8 \cdot L) \mu\text{m}, \quad (27)$$

gde je:

L izraženo u metrima.

Na osnovu dobijene zavisnosti može se zaključiti da su merenja do 15 mm u skladu sa dozvoljenom nesigurnošću za elektronski komparator, a za merenja graničnih planparalelnih mera dužina većih od 15 mm nesigurnost merenja je veća od dozvoljene.

Na slici 6 prikazana je funkcionalna zavisnost između R i m za ceo sistem laboratorija i za opseg merenja dužine do 100 mm.

Sl. 6 — Funkcionalna zavisnost reproduktivnosti od merene dužine

Zaključak

Na osnovu rezultata uporednih merenja, mogućnosti merenja graničnih planparalelnih mera do 100 mm i spoljašnjih mera do 50 mm u SR Jugoslaviji su:

— reproduktivnost kojom se mere granične planparalelne mere do 100 mm iznosi $R = \pm (0,031 + 1,8 \cdot L) \mu\text{m}$,

— reproduktivnost kojom se meri etalon-valjak od 50 mm iznosi $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Posebno treba istaći problem obrade i izražavanja rezultata merenja i merne nesigurnosti. Primećeno je da mnoge laboratorije neadekvatno obrađuju i tumače rezultate merenja [2], dok je izražavanje merne nesigurnosti [1] stalan problem koji se permanentno javlja u svim uporednim merenjima.

Izuzetno je izražen uticaj neadekvatno održavanih mikroklimatskih u-

slova, posebno temperature okoline, na kvalitet merenja. Netačnost rezultata u ovom ciklusu merenja u nekim laboratorijama prouzrokovana je lošim uslovima, nedovoljnim temperiranjem etalona i ispitivane mere, kao i neadekvatnim merenjem njihovih temperatura. Zbog toga treba naglasiti da su za ostvarenje pouzdanog i dovoljno tačnog rezultata merenja podjednako važni sledeći faktori: uslovi u laboratoriji, pravilno određena i etalonirana merna oprema i etaloni, stručnost metrologa koji obavlja merenja.

Visok nivo kvaliteta proizvoda, a posebno sredstava naoružanja i vojne opreme, uslovljen je velikim delom i razvojem metrologije, uspostavljanjem i održavanjem mernog jedinstva u metrološkom sistemu Jugoslavije. Obezbeđenjem visokog kvaliteta merenja ovaj cilj se može postići, a uporedna merenja jedan su od dobrih načina da se to ostvari.

Literatura:

- [1] Živković, V., Spasić, V.: Izveštaj o uporednim merenjima ovlašćenih laboratorija na području dužina, Glasnik SZMDM, 1985/3.
- [2] Živković, V., Zelenika, S.: Prikazivanje merne nesigurnosti rezultata interkomparativnih merenja etalona dužine u Jugoslaviji, Zbornik radova JUREMA 36, 3. sveska, 2.5 do 2.8, 1991.
- [3] ISO 5725: Precision of test methods — Determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests, ISO, 1986.
- [4] Pravila uporednih merenja etalon graničnih planparalelnih mera dužine i etalon valjka u sedmom ciklusu uporednih merenja etalona dužine, Zavod interno, 1995.
- [5] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993, ISO.
- [6] OIML IR 30 End Standards of Length, Chapter III Verification Methods, OIML SP4/Sr1, 1990.
- [7] Matsumoto, H.: Report on the Round — Robin Measurement of Gauge Blocks in 1992, Bulletin of NRLM, Vol. 42, No. 2, 169, 1993.