

# Mjerna nesigurnost i pravila odlučivanja kod određivanja klase točnosti mjerila

---

Bećir, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:939849>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-07**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Martin Bećir, Zagreb, 2020.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Student:

Martin Bećir

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. Dr.Sc. Lovorki Grgec Bermanec na izdvojenom vremenu te pomoći oko izrade završnog zadatka. Zahvaljujem se asistentu Ivanu Matasu na pomoći prilikom mjerenja u laboratoriju.

Martin Bećir



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Martin Bećir** Mat. br.: 0035206906

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerna nesigurnost i pravila odlučivanja kod određivanja klase točnosti mjerila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Measurement uncertainty and decision rules when declaring accuracy class of measuring instrument**

Opis zadatka:

Klasa točnosti mjerila tlaka je oznaka apsolutne vrijednosti najveće dopuštene pogreške pri upotrebi mjerila, izražene u postocima za cijelo mjerno područje. Međunarodna organizacija za akreditaciju laboratorija ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) nedavno je objavila novo izdanje Preporuke o pravilima odlučivanja i navođenju izjava o sukladnosti ILAC-G8:09/2019. Svrha ovog rada je eksperimentalno određivanje klase točnosti iz rezultata umjeravanja, tj. odstupanja i mjerene nesigurnosti primjenom postojećih preporuka za umjeravanje i novog izdanja ILAC-G8:09/2019 preporuke.

U radu je potrebno:

- Opisati metode umjeravanja mjerila tlaka i metode procjene mjerne nesigurnosti.
- Opisati metode i pravila odlučivanja prema ILAC-G8:09/2019 preporuci.
- Provesti umjeravanje najmanje dva mjerila tlaka u Laboratoriju za procesna mjerenja te odrediti odstupanja (koristiti ulje i plin kao tlačni medij).
- Procijeniti mjerne nesigurnosti dobivenih rezultata mjerenja.
- Provesti analizu rizika kod određivanja klase točnosti mjerila.

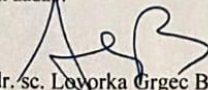
U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
28. studenog 2019.

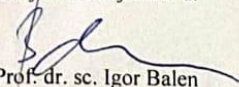
Datum predaje rada:  
1. rok: 21. veljače 2020.  
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.  
3. rok: 17. rujna 2020.

Predvideni datumi obrane:  
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.  
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.  
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadan:

  
Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

---

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. Umjeravanje i mjerna nesigurnost .....	1
2. Pravila odlučivanja (ILAC G8) .....	10
3. Etaloni za umjeravanje .....	13
4. Laboratorijska mjerenja .....	15
5. Rezultati.....	21
6. Određivanje klase točnosti mjerila na temelju pravila odlučivanja.....	26
7. ZAKLJUČAK.....	27
LITERATURA.....	28
PRILOZI.....	29

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Lanac sljedivosti .....	2
Slika 2. Prikaz postupka B metode umjeravanja.....	4
Slika 3. Prikaz C metode umjeravanja .....	4
Slika 4. Mjerna nesigurnost u bar-ima .....	9
Slika 5. Mjerna nesigurnost u odnosu na mjereni tlak .....	9
Slika 6. Rizik odluke pri mjerenju .....	10
Slika 7. Grafički prikaz sigurnosnog razmaka .....	11
Slika 8. Prikaz ne birnarnog pravila odlučivanja sa sigurnosnim razmakom .....	11
Slika 9. Shema tlačne vage.....	13
Slika 10. Shema sustava za mjerenje tlaka sa električnim zaslonom .....	15
Slika 11. TL VAG 09 .....	16
Slika 12. Utezi za tlačnu vagu.....	16
Slika 13. TL VAG 01 .....	19
Slika 14. Grafički prikaz mjerne nesigurnosti sa sigurnosnim razmakom $w=0,83U$ za TL VAG 09 .....	22
Slika 15. Grafički prikaz mjerne nesigurnosti sa sigurnosnim razmakom $w=0.83U$ za TL VAG 01 .....	24
Slika 16. Prikaz izračuna mjerne nesigurnosti točke 1 za B metodu .....	24
Slika 17. Prikaz izračuna mjerne nesigurnosti tečke 1 za C metodu.....	25

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Primjer tablice za certifikat umjeravanja .....	7
Tablica 2. Preporuke za sigurnosni prostor .....	12
Tablica 3. Podaci o etalonu iz umjernice za TL VAG 09 .....	17
Tablica 4. Mase utega iz umjernice za TL VAG 09.....	18
Tablica 5. Podaci iz umjernice za TL VAG 01 .....	19
Tablica 6. Podaci o masama iz umjernice za TL VAG 01 .....	20
Tablica 7. Rezultati mjerenja TL VAG 09 .....	21
Tablica 8. Izračunate vrijednosti parametara za TL VAG 09 .....	22
Tablica 9. Rezultati mjerenja TL VAG 01 .....	22
Tablica 10. Izračunate vrijednosti parametara za TL VAG 01 .....	23



**POPIS OZNAKA**

$A_0$	[m <sup>2</sup> ]	- efektivna površina pri atmosferskom tlaku
$A_e$	[m <sup>2</sup> ]	- efektivna površina (pri efektivnom tlaku)
$b$	[bar]	razlučivost
$b'$	[bar]	- ponovljivost
$c$	[m ]	- opseg klipa
$F$	[N]	- sila
$f_0$	[bar]	- odstupanje od nultočke
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	- gravitacijsko ubrzanje
$h$	[mm]	- razlika u visini u odnosu na referentni položaj
$h_{mean}$	[bar]	- mjerna nesigurnost uslijed histereze
$k$	[-]	- faktor pokrivanja
$m_i$	[kg]	- masa utega
$p$	[Pa]	- tlak
$p_e$	[Pa]	- efektivni tlak
$p_n$	[bar]	- nominalni tlak
$\Delta p$	[bar]	- odstupanje rezultata tlaka pri mjerenju
$\hat{\partial}p$	[bar]	- Nepoznato odstupanje rezultata tlaka pri mjerenju
$r$	[bar]	- rezolucija
$t$	[ °C]	- temperatura
$U$	[bar]	- mjerna nesigurnost
$U'$	[bar]	- raspon pogreške mjerne nesigurnosti

---

$x_i$	[bar]	- procijenjena ulazna vrijednost
$v$	[m <sup>3</sup> ]	- potopljeni volumen klipa
$\alpha_c$	[°C <sup>-1</sup> ]	- koeficijent temperature ekspanzije cilindra
$\alpha_k$	[°C <sup>-1</sup> ]	- koeficijent temperature ekspanzije klipa
$\Gamma$	[mN/m]	- površinska napetost
$\varepsilon$	[-]	- deformacija
$\theta$	[-]	- kut otklona klipa od vertikale
$\lambda$	[MPa <sup>-1</sup> ]	- koeficijent distorzije
$\rho_a$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- gustoća okolišnog zraka
$\rho_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- gustoća radnog fluida
$\rho_{mi}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- gustoća utega

---

**SAŽETAK**

Svrha ovog završnog rada je primijeniti pravila odlučivanja za ocjenjivanje razreda točnosti mjerila tlaka pomoću novog izdanja ILAC-G8:09/2019 preporuke. Mjerenja su izvršena u Laboratoriju za i procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Uvodni dio govori o postupku umjeravanja i relevantnim parametrima za analizu mjerne nesigurnosti te kako je procijeniti i grafički prikazati. Potom je po ILAC-ovom vodiču opisan rizik odluke s obzirom na mjernu nesigurnost te kako smanjiti taj rizik koristeći sigurnosni razmak. Dane su opće informacije za tlačnu vagu te opisane su tlačne vage koje za medij koriste zrak i ulje, na kojima je izvršeno mjerenje za ovaj završni rad. Dobiveni rezultati pomoću ne binarnog pravila odlučivanja pokazali su dobro izvršena mjerenja sa malim, ali prihvatljivim odstupanjima unutar intervala klase točnosti mjerila za oba mjerila tlaka.

Ključne riječi: mjerna nesigurnost, umjeravanje, pravila odlučivanja

---

**SUMMARY**

Purpose of this final thesis is to apply decision rules to evaluate accuracy class of pressure gauges by ILAC-G8:09/2019 guideline. Measurements were accomplished at Laboratory for process measurements at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. Preamble is about calibration of pressure gauges and relevant parameters for analysis measurement uncertainty and how to evaluate it and visualize it. Then it is described decision risk considering measurement uncertainty and how to lower that risk using guard band. It's given general information for pressure balances whose transmitting medium is oil and air, which measurements were made on for this final thesis. The result obtained by non-binary decision rule showed well done measurements with a small bit acceptable deviations inside interval of accuracy class for both pressure gauges.

Key words: measurement uncertainty, calibration, decision rules

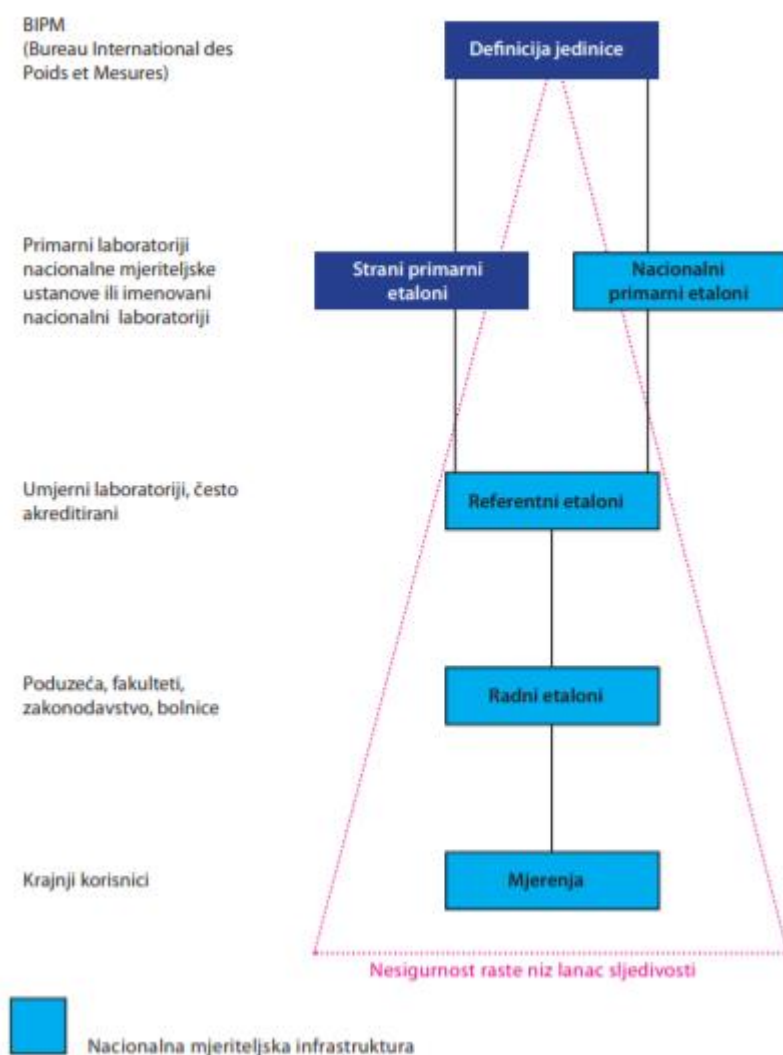
## **1. Umjeravanje i mjerna nesigurnost**

Danas se za umjeravanje tlaka najčešće koriste usporedbene metode opisane u DKD i EURAMET dokumentima. U ovom radu umjeravanje i izračun mjerne nesigurnosti provedene su prema DKD-R 6-1 čija je svrha ostvarivanje minimalnih zahtjeva za metode umjeravanja i procjenu mjerne nesigurnosti kod umjeravanja mjerila tlaka. [1]

### **1.1 Umjeravanje**

Umjeravanje mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari temeljno je oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti. Umjeravanje obuhvaća određivanje mjeriteljskih značajki mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari. Ono se, u pravilu, postiže izravnom usporedbom s etalonima ili potvrđenim referentnim tvarima. O umjeravanju se izdaje potvrda o umjeravanju, a najčešće se na umjereno mjerilo stavlja naljepnica. Četiri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. uspostavljanje i prikaz sljedivosti
2. osiguravanje da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima
3. određivanje točnosti očitavanja mjerila
4. utvrđivanje pouzdanost mjerila, tj. može li mu se vjerovati. [3]



**Slika 1. Lanac sljedivosti [3]**

Stanje umjeranog proizvoda za vrijeme umjeravanja treba biti u skladu s generalno prihvaćenim pravilima tehnologije i sa posebnim specifikacijama dokumentacije proizvođača.

Vanjske inspekcije pokrivaju:

- Vizualna inspekcija oštećenja
- Kontaminacija i čistoća
- Vizualnu inspekciju zapisa i čitljivosti indikacija
- Testiranje jesu li dokumenti potrebni za umjeravanje podneseni

Funkcionalni testovi pokrivaju:

- Zatvorenost sustava cijevi umjeranog proizvoda

- Električna funkcija
- Postavljanje elemenata u definiranu poziciju
- Izvršenje bez greške samoprovjere i/ili samopostavljajućih funkcija; ako je potrebno, interne referentne veličine trebaju biti očitane EDP sučeljem
- Ovisnost okretnog momenta za vrijeme namještanja

Umjeravanje treba biti izvršeno poslije izjednačavanja temperature umjeravanog proizvoda i okoliša. Vrijeme potrebno za zagrijavanje umjeravanog proizvoda ili potencijalno zagrijavanje umjeravanog proizvoda uslijed napajanja strujom treba biti uzeto u obzir.

Umjeravanje treba biti provedeno pri okolnoj temperaturi stabilnoj za  $\pm 1K$  te ta temperatura mora biti između  $18^{\circ}\text{C}$  i  $28^{\circ}\text{C}$  i treba biti zabilježena.

Ako gustoća zraka ima utjecaja na rezultat umjeravanja, ne samo okolna temperatura već atmosferski zrak i relativna vlažnost trebaju biti zabilježeni.

- Mjerilo tlaka treba biti umjeravano kao cijelo (mjerni lanac), ako je moguće
- Specijalna namještena pozicija treba biti uzeta u razmatranje
- Umjeravanje treba biti izvršeno u mjernim točkama ravnomjerno raspoređenim preko cijele umjeravane skale
- Ovisno o ciljanoj mjernoj nesigurnosti, jedna ili više serija mjerenja su potrebne
- Ako ponašanje umjeravanog proizvoda uz utjecaj okretnog momenta za vrijeme namještanja nije poznato, umjeravani proizvod treba spojiti još jednom za utvrđivanje razlučivosti. U ovom slučaju, okretni moment treba biti izmjeren i dokumentiran

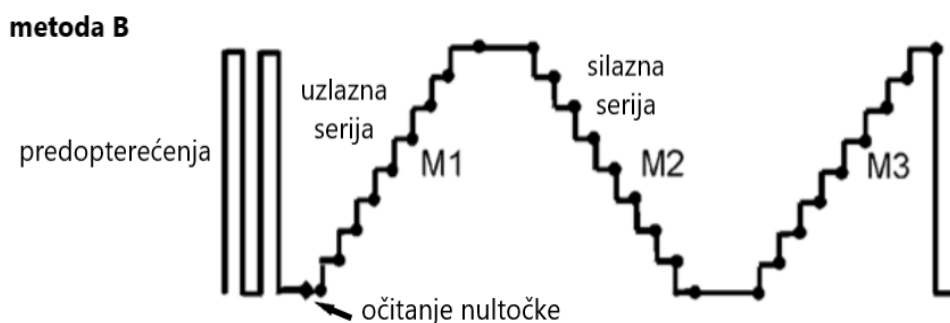
Pri primjeni, daljnje utjecajne veličine (npr. utjecaj temperature iz drugih ciklusa mjerenja na različitim temperaturama) mogu biti utvrđeni.

Usporedba između mjernih vrijednosti umjeravanog proizvoda i referentnih ili radnih uvjeta može biti napravljena s dvije različite metode:

- Umjeravanje tlaka prema indikaciji instrumenta za umjeravanje
- Umjeravanje tlaka prema indikaciji standarda

Vrijeme za predopterećenje na najveću vrijednost i vrijeme između dva predopterećenja treba trajati najmanje 30 sekundi. Nakon predopterećenja i poslije postignutog stabilnog stanja i umjeravani proizvod dopusti negativne vrijednosti, indikacija umjeravanog instrumenta je stavljena na nulu. Očitavanje u neopterećenom stanju je vrši odmah poslije toga. Za promjenu

koraka tlaka u mjernim serijama, vrijeme između dva uspješna koraka opterećenja treba biti isto i ne biti kraće od 30 sekundi i očitavanje treba biti napravljeno najmanje 30 sekundi nakon početka promjene tlaka. Mjerna vrijednost za gornju granicu umjeravanog raspona treba biti zapisana prije i poslije vremena čekanja. Očitavanje neopterećenog stanja na kraju mjerne serije se radi najmanje 30 sekundi nakon potpunog rasterećenja.



Slika 2. Prikaz postupka B metode umjeravanja

Metoda B se sastoji od dva predopterećenja te dvije uzlazne i jedne silazne serije mjerenja.



Slika 3. Prikaz C metode umjeravanja

Metoda C se sastoji od predopterećenja te uzlazne i silazne serije mjerenja. [1]

## 1.2 Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost je parametar koji je utvrđen skupa sa mjerenim rezultatima tj. pripisuje se rezultatima mjerenja i opisuje interval vrijednosti koji se može razumno dodijeliti izmjerenoj vrijednosti mjerenja.

Odluka o vrijednosti standardne nesigurnosti je bazirana na drugim znanstvenim saznanjima i može biti procijenjena na temelju sljedećih informacija:

- Podaci prethodnih mjerenja



- Znanje i iskustvo s obzirom na karakteristike i ponašanje mjernih instrumenata i materijala
- Proizvođačeve specifikacije
- Umjeravanje i drugi certifikati
- Referentni podaci iz priručnika

U mnogo slučajeva gornja  $a_+$  i donja  $a_-$  granica mogu biti utvrđene kao vrijednost količine, gdje sve vrijednosti unutar granica mogu biti promatrane kao jednako vjerojatne. Situacija je najbolje opisana kao pravokutna Gustoća vjerojatnosti.

$$a_+ - a_- = 2a$$

procjena ulaznih vrijednosti

$$x_i = \frac{1}{2} \cdot (a_+ + a_-)$$

i pripadna mjerna nesigurnost je:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad [3]$$

### 1.2.1 Umjeravanje mjerila tlaka s električnim zaslonom

Model procjenjivanje je jednostavan zbroj/razlika model je prikladan za određivanje mjernog odstupanja indikacije. Radi se posebno za vrijednosti uzlazne serije mjerenja i posebno za silazne vrijednosti serije mjerenja.

$$\Delta p_{\text{up/down}} = p_{\text{ind. up/down}} - p_{\text{standard}} + \hat{c}p_{\text{zero deviation}} + \hat{c}p_{\text{repeatability}} + \hat{c}p_{\text{reproducibility}}$$

Za srednje vrijednosti:

$$\Delta p_{\text{mean}} = p_{\text{ind. mean}} - p_{\text{standard}} + \hat{c}p_{\text{zero deviation}} + \hat{c}p_{\text{repeatability}} + \hat{c}p_{\text{reproducibility}}$$

$$\Delta p_{\text{mean}} = (p_{\text{ind. up}} - p_{\text{ind. down}}) / 2$$

Kada se uzlazna i silazna serija računaju odvojeno, proširena mjerna nesigurnost za  $k=2$  je:

$$U_{\text{up/down}} = k \cdot u_{\text{up/down}}$$

$$U_{\text{up/down}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{standard}}^2 + u_{\text{resolution}}^2 + u_{\text{zero deviation}}^2 + u_{\text{repeatability}}^2 + u_{\text{reproducibility}}^2}$$

I raspon pogreške dopušta sistematičnu devijaciju:

$$U'_{\text{up/down}} = U_{\text{up/down}} + |\Delta p_{\text{up/down}}|$$

Kada su korištene srednje vrijednosti uzlazne i silazne serije mjerenja, proširena nesigurnost  $U$  s  $k=2$  se računa:

$$U_{\text{mean}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{up/down}}^2 + u_{\text{hysteresis}}^2}$$

Gdje za izračun mjerne nesigurnosti  $u_{\text{up/down}}$  veća vrijednost ponovljivosti treba biti korištena.

Pridruženi raspon greške je određen:

$$U'_{\text{mean}} = U_{\text{mean}} + |\Delta p_{\text{mean}}| \quad [3]$$

## 1.2.2 Odlučivanje o relevantnim parametrima za analizu sigurnosti

Relevantni parametri za analizu sigurnosti su rezolucija, odstupanje od nultočke, ponovljivost te histereza.

### 1.2.2.1 Rezolucija 'r'

Ako indikacija varira za najviše jedan digitalni korak kad mjerač tlaka nije opterećen, rezolucija odgovara digitalnom koraku.

Računa se tako da na temelju indikacije znamo koliki je digitalni korak koji se pomnoži sa faktorom za rezoluciju kojeg se dobije tako da pola vrijednosti rezolucije se pridruži polovici raspona pravokutne raspodjele vjerojatnosti.

### 1.2.2.2 Odstupanje od nultočke 'f<sub>0</sub>'

Nultočka treba biti postavljena prije svakog ciklusa mjerenja koji se sastoji od uzlazne i silazne serije mjerenja te treba biti zapisana prije i poslije svakog mjernog ciklusa. Očitavanje se vrši nakon što je instrument potpuno neopterećen.

Odstupanje od nultočke se dobiva očitanjem iz mjerenja te oduzimanjem jednog očitavanja od drugog te se uzima njihova najveća apsolutna vrijednost:

$$f_0 = \max \{ |x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|, |x_{6,0} - x_{5,0}| \}$$

gdje prvi indeks u x označava seriju mjerenja.

### 1.2.2.3 Ponovljivost 'b'

Ponovljivost se određuje razlikom dvaju istosmjernih (uzlazna/silazna) serija mjerenja korigiranim očitanjem nultočke.

$$b'_{\text{up},j} = |(x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})|$$

$$b'_{\text{down},j} = |(x_{4,j} - x_{4,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})|$$

$$b'_{\text{mean},j} = \max \{ b'_{\text{up},j}, b'_{\text{down},j} \}$$

### 1.2.2.4 Histereza 'h'

Kada su srednje vrijednosti navedene, histereza je određena korekcijom nultočke vrijednosti mjerenja uzlaznih i izlaznih serija

$$h_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \cdot \left\{ \left| X_{2,j} - X_{1,0} \right| - \left( X_{1,j} - X_{1,0} \right) \right\}$$

gdje je n broj izvršenih ciklusa mjerenja.

### 1.2.2.5 Razlučivost 'b'

Razlučivost je parametar mjerne nesigurnosti koji se za ne promijenjene uvjete računa na sljedeći način:

$$b_{\text{up},j} = \left| (X_{3,j} - X_{3,0}) - (X_{1,j} - X_{1,0}) \right|$$

$$b_{\text{down},j} = \left| (X_{4,j} - X_{4,0}) - (X_{2,j} - X_{2,0}) \right|$$

$$b_{\text{mean},j} = \max \{ b_{\text{up},j}, b_{\text{down},j} \}$$

## 1.2.3 Procjena mjerne nesigurnosti i izvještaj u certifikatu umjeravanja

Svaki uređaj koji sudjeluje u lancu umjeravanja mora imati oznaku umjeravanja.

U certifikatu umjeravanja sljedeće informacije trebaju biti navedene:

- Metoda umjeravanja (A,B,C metoda)
- Srednji prijenos tlaka
- Referentna ravnina za tlak na umjeravanom instrumentu
- Pozicija instrumenta za umjeravanje
- Zadana svojstva umjeravanog instrumenta

Certifikat umjeravanja treba sadržavati tablicu svi izmjerenih vrijednosti kao npr.:

**Tablica 1. Primjer tablice za certifikat umjeravanja**

Tlak  p <sub>standard</sub>	Vrijednost na zaslonu p <sub>ind</sub>		
	Umjeravanje metodom B		
	Umjeravanje metodom C		
bar	M1 (uzlazno)	M2 (silazno)	M3 (uzlazno)

Pascal	bar, Pascal, A, V...		
min.	min.	min.	min.
↓	↓	↑	↓
max.	max.	max.	max.

Stupac 1 sadrži vrijednosti tlaka izmjerene za etalon. Stupci 2 do 4 sadrže odgovarajuće vrijednosti mjerenja prikazane umjeravanim instrumentom koji može imati manometar s kazaljkom, električni zaslon koji pokazuje tlak u nekim jedinicama tlaka (bar, Pa) ili izlazni signal u nekoj drugoj mjernoj jedinici koju treba pretvoriti u jedinicu tlaka.

Daljnje procjene mjerenih vrijednosti mogu uključivati sljedeće karakteristike:

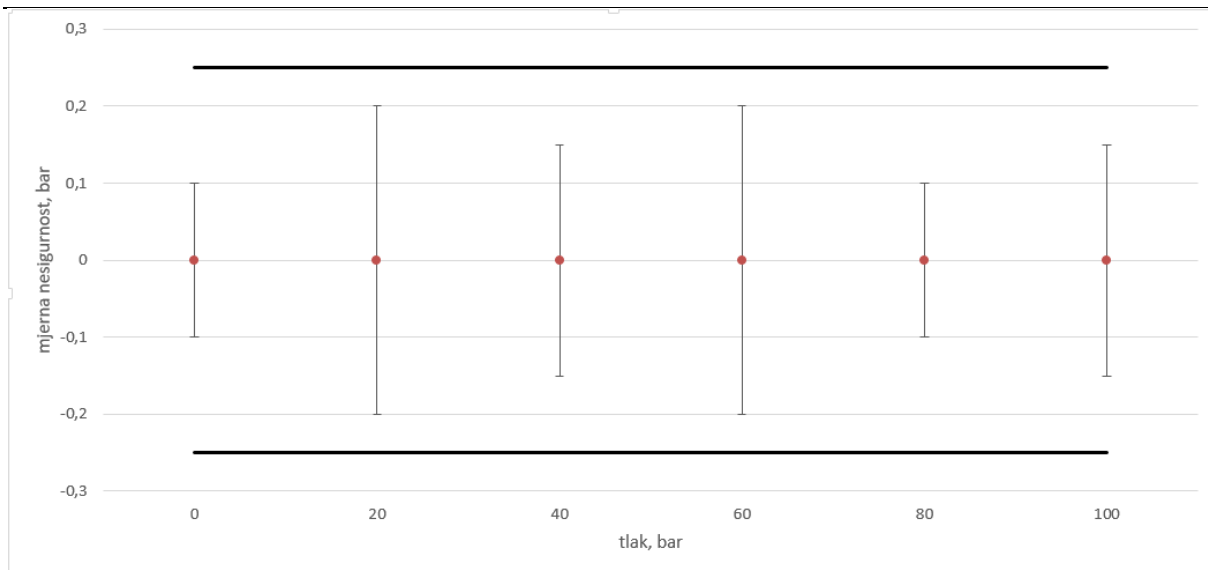
- Srednje vrijednosti
- Mjerno odstupanje zaslona
- Odstupanje nultočke
- Ponovljivost
- Razlučljivost
- Histereza
- Raspon pogreške
- Sljedivost

Srednja vrijednost  $\overline{x_{i,J}}$  za  $i=up/down$  se računa na sljedeći način:

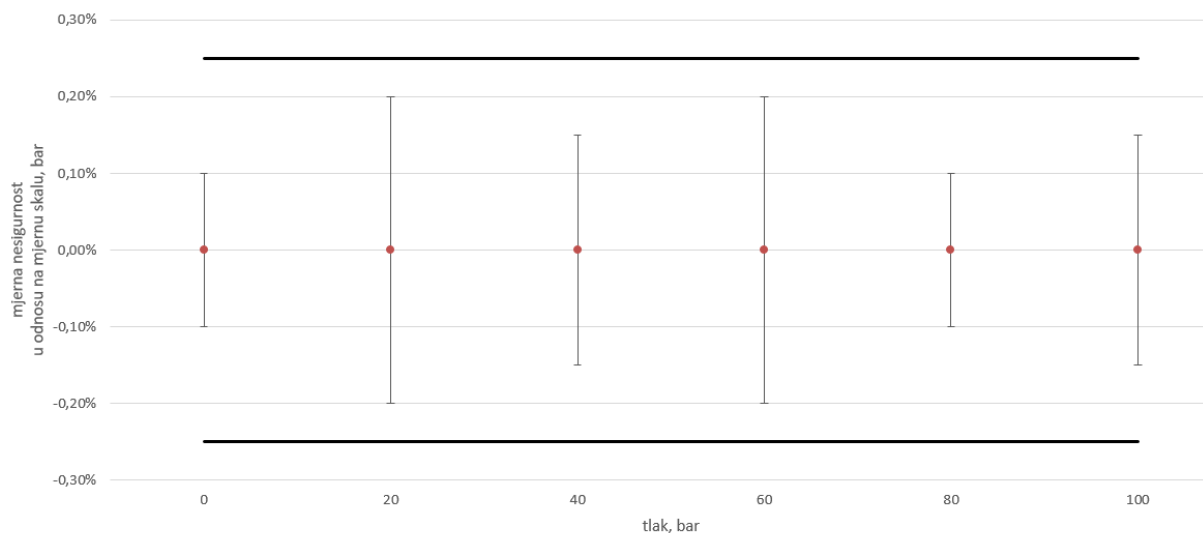
$$\overline{x_{mean}} = \frac{\overline{x_{up,J}} + \overline{x_{down,J}}}{2}$$

#### 1.2.4 Izgled rezultata umjeravanja

Za bolje razumijevanje i lakši pregled, rezultati umjeravanja se prikazuju u grafičkom obliku. Graf treba pokazivati ovisnost mjerne nesigurnosti i odstupanja o mjerenim tlakovima. Mjerna nesigurnost i odstupanje se stavljaju na y os dok mjereni tlakovi stoje na x osi. Mjerna jedinica mjernog odstupanja i mjerne nesigurnosti može biti u bar-ima ili u postotku koji prikazuje odnos veličina na y osi u odnosu na x os. [1]



**Slika 4. Mjerna nesigurnost u bar-ima**



**Slika 5. Mjerna nesigurnost u odnosu na mjereni tlak**

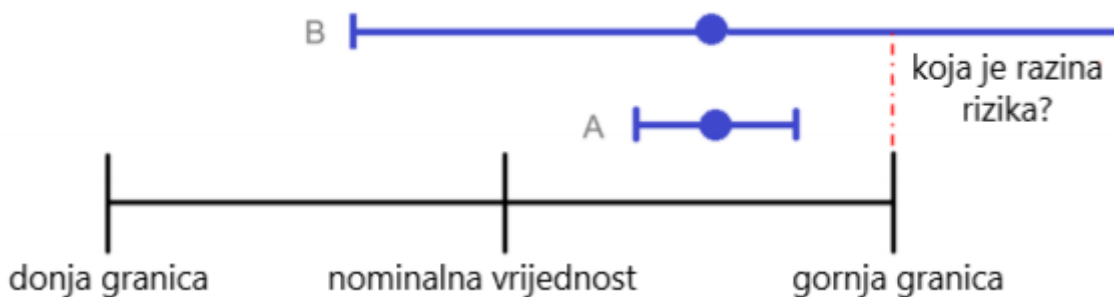
## 2. Pravila odlučivanja (ILAC G8)

### 2.1 o Ilac-u

ILAC je globalna zajednica za akreditaciju laboratorija, inspekcijskih tijela čiji su članovi akreditacijska tijela. Njihova svrha je pomoći globalnoj zajednici donoseći univerzalna pravila kako bi se izbjeglo ponovno testiranje istih proizvoda u različitim zemljama. ILAC vodič je napravljen da pomaže laboratorijima pri upotrebi pravila odlučivanja kada objavljuju izjavu o sukladnosti s nekom specifikacijom ili standardom. [4]

### 2.2 Mjerna nesigurnost i rizik odluke

Kada se mjerenje promatra unutar strogo određenih granica tolerancije dva su moguća ishoda, rezultat je unutar ili van tih granica. Tada izjava o sukladnosti ili je točna ili je netočna. Svaki rezultat mjerenja ima svoju mjernu nesigurnost. Mjerna nesigurnost, primjer prikazuje slika 6. rezultata A je u određenim granicama, dok mjerna nesigurnost točke B prelazi maksimalnu gornju vrijednost. Ne možemo prihvatiti rezultat B i smatrati ga jednakim kao rezultat A upravo zbog njegove mjerne nesigurnosti. Prihvaćanje B rezultat nema jednaku dozu rizika kao prihvaćanje A rezultata.

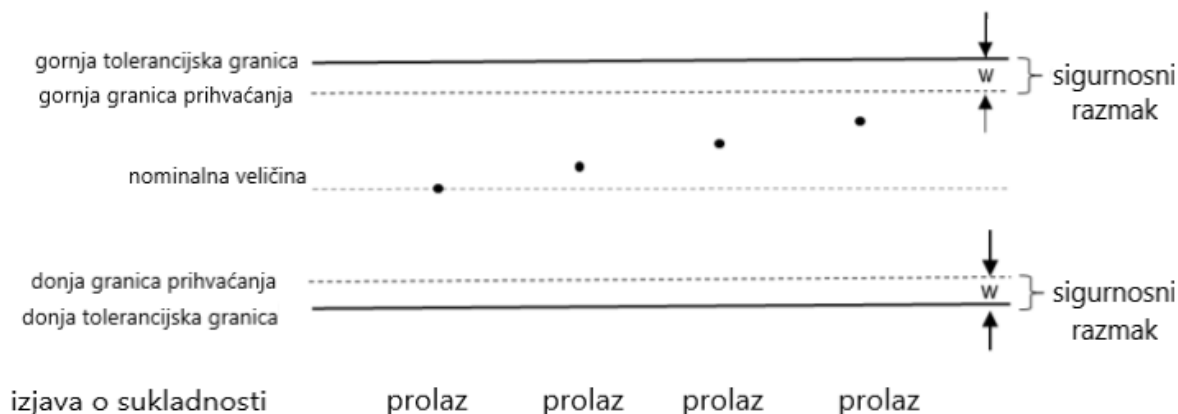


Slika 6. Rizik odluke pri mjerenju

### 2.3 Sigurnosni razmak i pravila odlučivanja

Uloga sigurnosnog razmaka može smanjiti vjerojatnost donošenja krive odluke kod izjave o sukladnosti. To je zapravo sigurnosni faktor koji se očitava u pomicanju gornje granice prema dolje, a donje granice prema gore. Pomaknute granice smanjuju interval u kojem će određeno mjerenje biti u skladu s određenim propisom. Duljina sigurnosnog prostora je jednaka razlici duljina tolerancijske linije i linije prihvaćanje. Kada je duljina sigurnosnog prostora  $w=0$

prihvaća se rezultat unutar granica tolerancije. To se naziva jednostavno prihvaćanje i ono sa sobom donosi određenu dozu rizika, maksimalno 50% vjerojatnosti da je rezultat van tolerancijskih linija, ako leži točno na tolerancijskoj liniji.

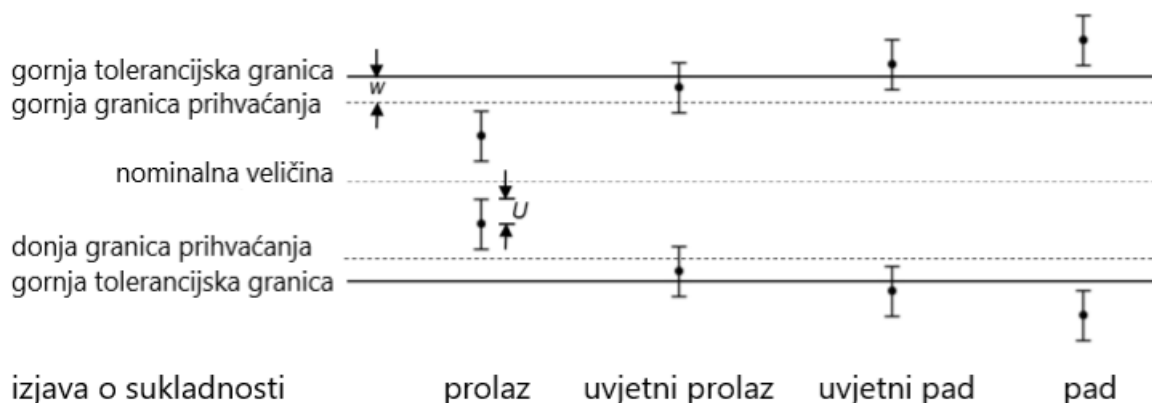


Slika 7. Grafički prikaz sigurnosnog razmaka

## 2.4 Ne binarni način sa sigurnosnim razmakom

Izjave o sukladnosti dane su kao:

- Prolaz - rezultat je unutar granica prihvaćanja
- Uvjetni prolaz - rezultat je unutar sigurnosnog prostora ali mjerna nesigurnost prelazi tolerancijske granice
- Uvjetni pad - rezultat je izvan granica tolerancije ali mjerna nesigurnost mu je u sigurnosnom prostoru
- Pad - rezultat i mjerna nesigurnost su izvan granica tolerancije



Slika 8. Prikaz ne binarnog pravila odlučivanja sa sigurnosnim razmakom

Za izravno izračunatu mjernu nesigurnost preporuke za sigurnosni prostor su:

**Tablica 2. Preporuke za sigurnosni prostor**

Sigurnosni prostor, w	rizik
1,5 U	< 0.16% PFA
1 U	< 2,5% PFA
0.83 U	< 5% PFA
0	<50% PFA

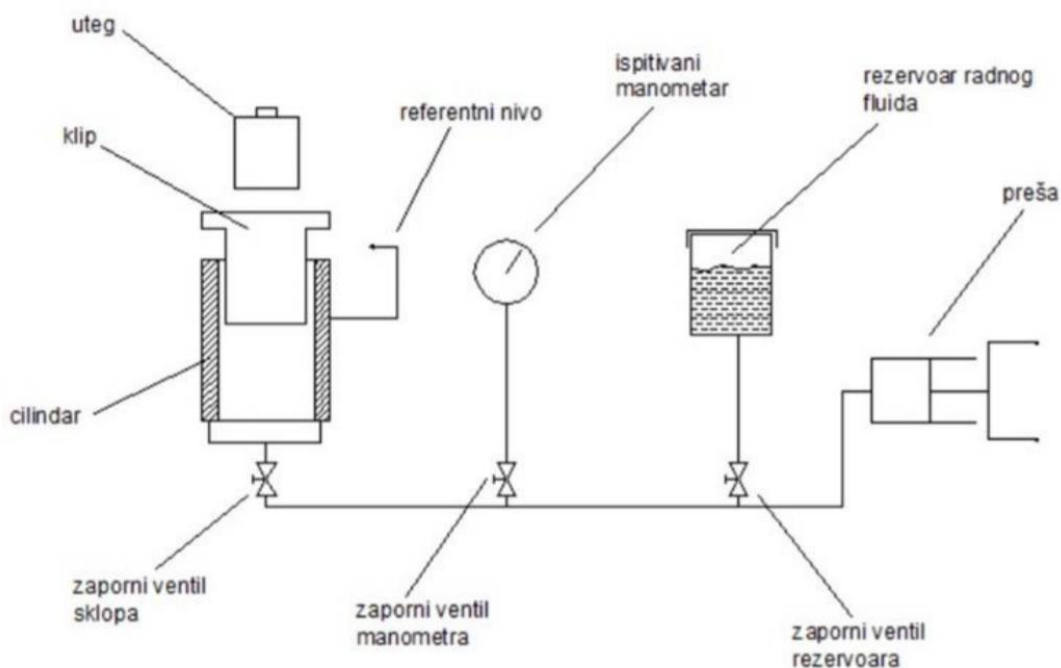
PFA- probability of false accept (vjerojatnost prihvatanja krivog rezultata) [4]



### 3. Etaloni za umjeravanje

U ovom radu za umjeravanje mjerila tlaka etaloni su bili tlačne vage. Tlačne vage su instrumenti za precizno mjerenje tlaka. Koriste se kao etalon za umjeravanje mjerila tlaka. Njihov osnovni mehanizam je klip/cilindar. Princip rada je tlačenje fluida utezima poznate mase. Tlak se izračuna tako da se sila podijeli sa poznatom efektivnom površinom klipa.

$$p_e = \frac{F}{A_e}$$



Slika 9. Shema tlačne vage

#### 3.1. Zahtjevi za tlačnu vagu

Glavni dio svake tlačne vage je sklop klip-cilindar. Zahtjevi za izradu "idealnog" sklopa su:

- materijal koji ima mali koeficijent temperaturne ekspanzije i koji dobro podnosi naprezanja (obično volfram karbid, čelik, keramika)
- površine izrađene na mikronskom nivou
- mali i konstantni međuprostor između klipa i cilindra (obično od 0,5 μm do 1 μm, bez trenja između dijelova)
- propadanje klipa mora biti sporo, jednoliko i dobro ponovljivo u cijelom mjernom području

Ovi zahtjevi su u pravilu ispunjeni samo kod visokokvalitetnih sklopova koje koriste nacionalni laboratoriji. [5]

### 3.2 Uljne tlačne vage

Odabir primjerenog uljnog medija nije lak zadatak zbog tražene viskoznosti ulja. Odabirom ulja niske viskoznosti imamo brz odziv sustava i nisku deceleraciju klipa dok visoka viskoznost ulja reducira prodor ulja kroz zazor između cilindra i klipa. Sljedeći izraz koristi se za izračunavanje efektivnog tlaka:

$$p_e = \frac{[\sum_i (m_i \cdot (1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}})) + (A_0 \cdot h - v) \cdot (\rho_f - \rho_a)] \cdot g \cdot \cos \theta + \Gamma \cdot c}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot (1 + \alpha_k + \alpha_c \cdot (t - 20))}$$

gdje je  $p_e$ , efektivni iznos tlaka generiran na sklopu;  $m_i$ , prava masa i-tog utega postavljenog na sklop;  $g$ , iznos lokalnog gravitacijskog ubrzanja;  $\rho_a$ , gustoća zraka okoline;  $\rho_{mi}$ , gustoća i-tog utega;  $\rho_f$ , gustoća radnog medija;  $\alpha_k$ , koeficijent temperaturnog rastezanja klipa;  $\alpha_c$ , koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra;  $A_0$ , efektivna površina sklopa pri nultom tlaku;  $t$ , temperature sklopa za vrijeme ispitivanja;  $t_r$ , referentna temperatura pri kojoj je mjerena  $A_0$ ;  $\lambda$ , koeficijent elastične deformacije;  $\theta$ , kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalu;  $v$ , volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida;  $h$ , razlika visina etalonskog i ispitivanog sklopa;  $\Gamma$ , opseg klipa;  $c$ , površinska napetost radnog medija. **Error! Reference source not found.**

### 3.3. Plinske tlačne vage

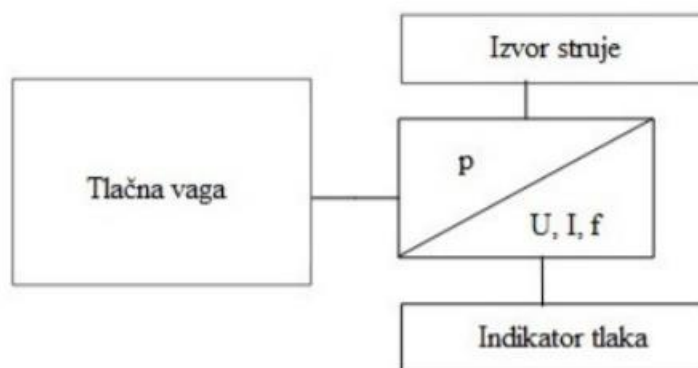
$$p_e = \frac{[\sum_i (m_i \cdot (1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}})) + (A_0 \cdot h - v) \cdot (\rho_f - \rho_a)] \cdot g \cdot \cos \theta}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot (1 + \alpha_k + \alpha_c \cdot (t - 20))}$$

Plinske tlačne vage kao radni fluid koriste filtrirani zrak ili dušik bez udjela kisika. Potrebno je određeno vrijeme za stabilizaciju klipa zbog niže viskoznosti radnog fluida. U apsolutnom modu vanjski tlak je okolišni tlak dok je u pretlačnom modu okolišni zrak evakuiran te je vanjski tlak, zapravo potlak, određen zaostalim zrakom. Plinske tlačne vage za razliku od uljnih nemaju faktor korekcije za napetost ulja  $\Gamma \cdot c$ . [5]

#### 4. Laboratorijska mjerenja

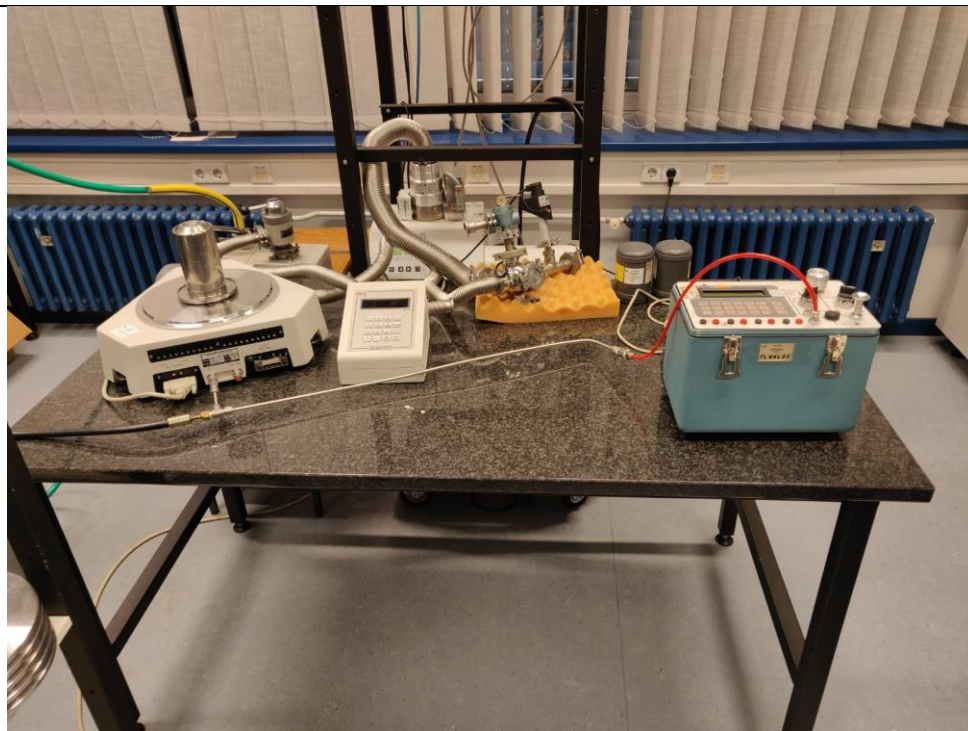
Mjerenja su provedena u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta Strojарstva i Brodogradnje. U sklopu Visoke Tehničke škole 1960. godine nastaje Laboratorij za toplinska mjerenja, čiji je današnji nasljednik Laboratorij za procesna mjerenja. U Laboratoriju za procesna mjerenja se održavaju vježbe za potrebe preddiplomskog, diplomskog i postdiplomskog studija. Deutscher Kalibrierdienst (DKD) akreditira laboratorij 2002. godine te tako Laboratorij za procesna mjerenja postaje nositelj državnih etalona tlaka i temperature. Nositelj državnog etalona vlažnosti postaje 2008. godine.

Mjerenja su provedena na tlačnoj vagi čiji je medij ulje (TL VAG 01) te tlačnoj vagi čiji je medij zrak (TL VAG 09). Mjerenja su provedena u dva različita dana te je prvo trebalo odrediti okolišne uvjete prije početka mjerenja. Okolišni uvjeti koje treba odrediti prije početka mjerenja su: temperatura, tlak i relativna vlažnost.

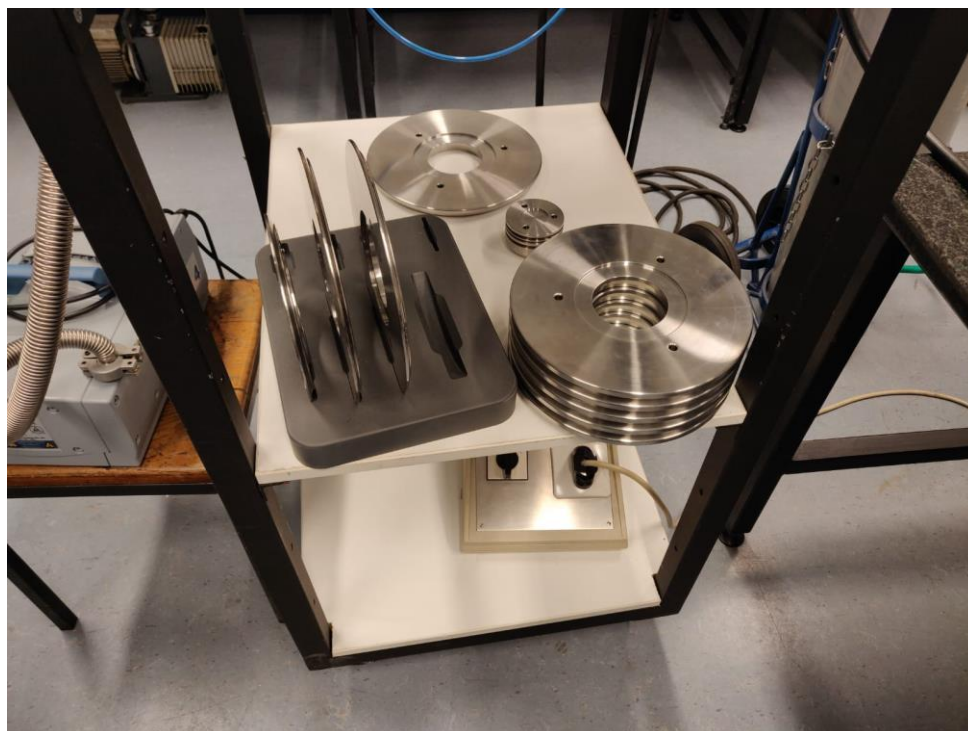


**Slika 10. Shema sustava za mjerenje tlaka sa električnim zaslonom [1]**

Za TL VAG 09 odlučeno je provesti B metodu umjeravanja. Raspon mjerne skale iznosi od 0 do 2000 mbar-a. Određeni su okolišni uvjeti koji su prikazani u rezultatima.



Slika 11. TL VAG 09



Slika 12. Utezi za tlačnu vagu

Tablica 3. Podaci o etalonu iz umjernice za TL VAG 09

Podaci o etalonu	Oznaka	Iznos	Jedinica	Nesigurnost (k=2)
Efektivna površina	$A_o$	9,805024E-04	m <sup>2</sup>	2,70E-08
Koeficijent distorzije	$l$	4,200000E-07	bar <sup>-1</sup>	0
Volumen za koji se radi korekcija	$v$	0,000000E+00	m <sup>3</sup>	0,5
Gustoća dušika	$r_N$		kg/m <sup>3</sup>	
Ubrzanje sile teže za LPM	$g$	9,806218	m/s <sup>2</sup>	0,00002
Opseg klipa	$G$	1,109735E-01	m	0
Koef. temp. ekspanzije	$a_{p+c}$	9,00E-06	°C <sup>-1</sup>	2,00E-06

Tablica 4. Mase utega iz umjernice za TL VAG 09

Oznaka na utegu	Masa utega	Nesigurnost mase	Nominalni tlak	Gustoća utega	Nesigurnost gustoće
	$m$	$u_m$	$p_n$	$r_m$	$u_{r_m}$
	g	g	bar	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )
o.u.	499,99900	0,1000	0,050	10080,0	75
dodatak	300,00340	0,0000	0,030	7975,0	75
dodatak	0,00000	0,0000	0,000	7975,0	75
1	100,00110	0,0004	0,010	7975,0	75
2	199,99820	0,0006	0,020	7975,0	75
3	200,00160	0,0006	0,020	7975,0	75
4	500,0031	0,0015	0,050	7975,0	75
5	1000,013	0,0025	0,100	7975,0	75
6	2000,026	0,0058	0,200	7975,0	75
7	2000,026	0,0046	0,200	7975,0	75
8	4500,024	0,0067	0,450	7975,0	75
9	5000,044	0,0089	0,500	7975,0	75
10	5000,062	0,0086	0,500	7975,0	75
11	5000,011	0,0072	0,500	7975,0	75
12	5000,044	0,0077	0,500	7975,0	75

Za TL VAG 01 odlučeno je provesti C metodu umjeravanja. Raspon mjerne skale iznosi od 0 do 135 bar-a. Određeni su okolišni uvjeti koji su prikazani u rezultatima.



Slika 13. TL VAG 01

Tablica 5. Podaci iz umjernice za TL VAG 01

Podaci o etalonu (iz umjernice):	Oznaka	Iznos	Jedinica
Efektivna površina	$A_0$	8,065150E-06	$\text{m}^2$
Koeficijent distorzije	$\square$	3,300000E-07	$\text{bar}^{-1}$
Volumen za koji se radi korekcija	$v$	0,000000E+00	$\text{m}^3$
Gustoća ulja (bijelo ulje)	$\square$	855,00	$\text{kg}/\text{m}^3$
Površinska napetost ulja	$\square$	3,000000E-02	$\text{N}/\text{m}$
Ubrzanje sile teže za LPM	$g$	9,806650E+00	$\text{m}/\text{s}^2$
Opseg klipa	$\square$	1,006470E-02	$\text{m}$
Koef.temp.ekspanzije	$\square$	2,20E-05	$^{\circ}\text{C}^{-1}$

Tablica 6. Podaci o masama iz umjernice za TL VAG 01

Oznaka na utegu	Masa utega	Nominalni tlak $p_n$	Gustoća utega
-	g	bar	(kg/m <sup>3</sup> )
o.u.	822,51000	-	7800,0
dodatak	0,00000	-	7800,0
dodatak	0,00000	-	7800,0
1	8224,42000	100,0	7800,0
2	8224,78000	100,0	7800,0
3	8224,69000	100,0	7800,0
4	8224,61000	100,0	7800,0
5	7402,43000	90,0	7800,0
6	4112,27000	50,0	7800,0
7	1644,99000	20,0	7800,0
8	1644,99100	20,0	7800,0
9	822,88200	10,0	7800,0
10	411,23100	5,0	7800,0



## 5. Rezultati

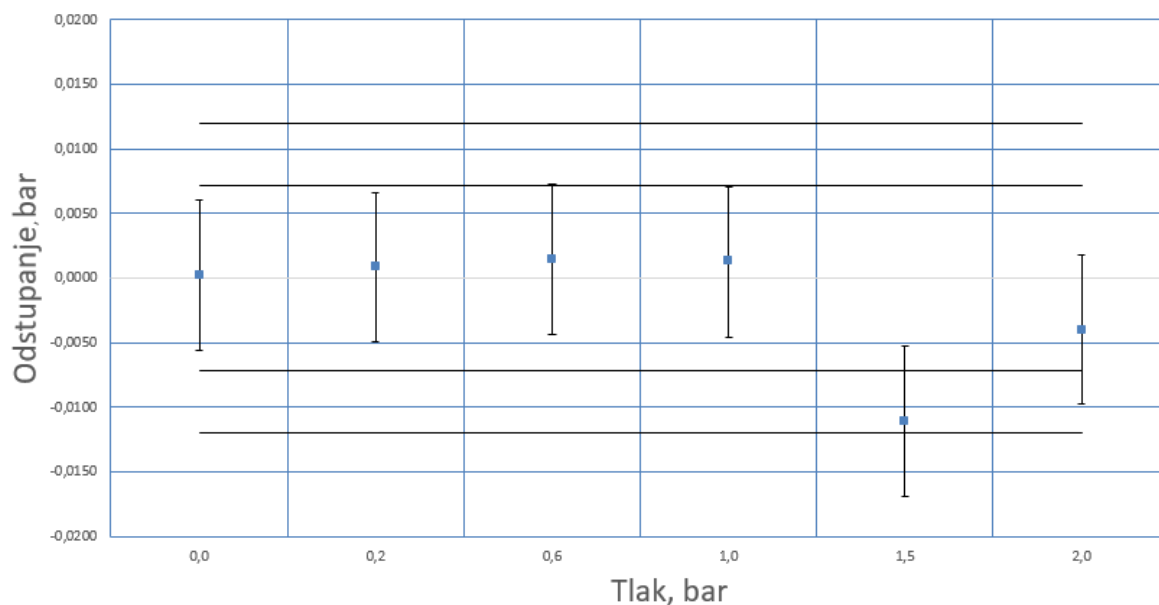
**Tablica 7. Rezultati mjerenja TL VAG 09**

Mjerilo		Kalibrator tlaka			
Mjerno područje		0-2,5 bar			
Jedinica tlaka		mbar			
Podjela skale		0,1 mbar			
Razred točnosti		0,6%			
Radni etalon		TL VAG 09			
Uvjeti ispitivanja					
Temperatura	26±1 °C	tlak	1013,62 mbar	Relativna vlaga	28%±1
Tip umjeravanja		B			
	Tlak etalona	Utezi br:	Očitanje		
	p <sub>n</sub>		M1	M2	M3
1.	0	-	0	0,5	0
2.	200	2,5	200,4	201,0	200,9
3.	600	2,5,6,7	600,9	601,7	601,4
4.	1000	2,4,6,7,8	1000,7	1001,5	1001,1
5.	1500	1,2,6,7,9 ,10	1498,5	1499,2	1498,6
6.	2000	2,6,7,9,1 0,11	1995,8	1996,1	1995,7

Tablica 8. Izračunate vrijednosti parametara za TL VAG 09

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona	Pokazivanje mjerila			Srednja vrijednost M bar	Odstupanje M-pe bar	Ponovljivost b bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar	Uzlazno bar					
1	0,00000	0,0000	0,0005	0,0000	0,0003	0,0003	0,0000	0,0005	0,00581
2	0,19999	0,2004	0,2010	0,2009	0,2008	0,0008	0,0005	0,0006	0,00582
3	0,59998	0,6009	0,6017	0,6014	0,6014	0,0014	0,0005	0,0008	0,00583
4	0,99996	1,0007	1,0015	1,0011	1,0012	0,0012	0,0004	0,0008	0,00582
5	1,50995	1,4985	1,4992	1,4986	1,4989	-0,0111	0,0001	0,0007	0,00582
6	1,99992	1,9958	1,9961	1,9957	1,9959	-0,0040	-0,0001	0,0003	0,00581

TL VAG 0.9

Slika 14. Grafički prikaz mjerne nesigurnosti sa sigurnosnim razmakom  $w=0,83U$  za TL VAG 09

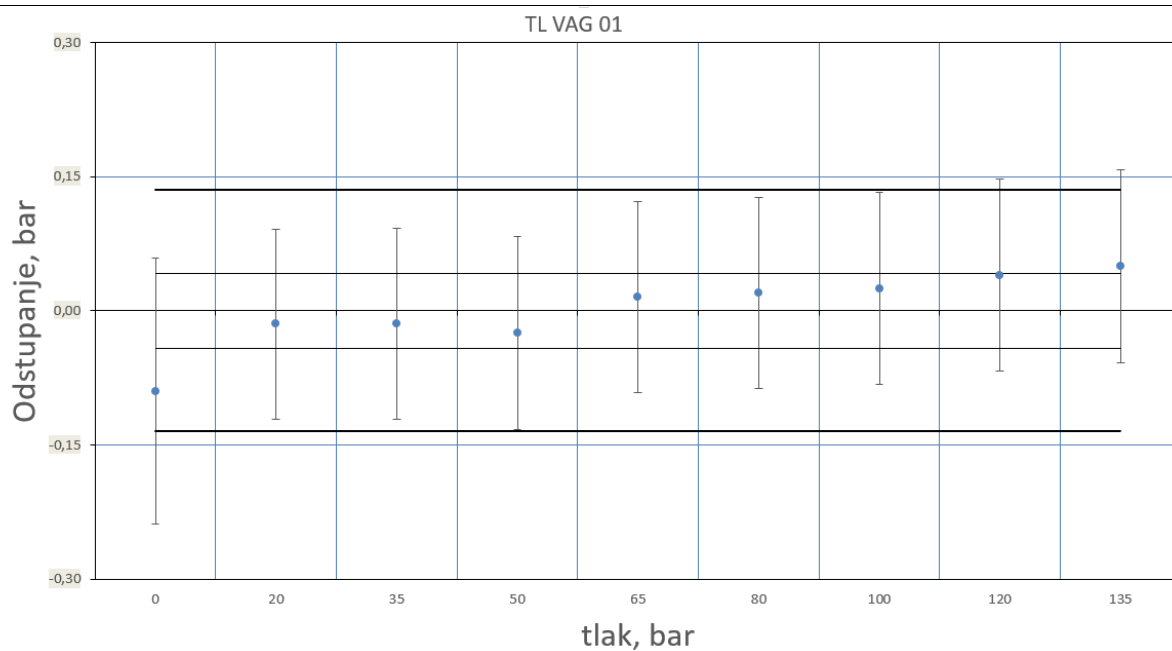
Tablica 9. Rezultati mjerenja TL VAG 01

Mjerno područje		0-2 bar			
Jedinica tlaka		bar			
Podjela skale		0,01 bar			
Razred točnosti		0,1% FS			
Radni etalon		TL VAG 01			
Uvjeti ispitivanja					
Temperatura	$27 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$	Tlak	$1010 \pm 1 \text{ kPa}$	Relativna	$23 \pm 1\%$
Tip umjeravanja			C		
	Tlak	Utezi br.	Očitanje		
	$p_n$		M1	M2	
1.	0		0	-0,18	

2.	20	9	19,99	19,98
3.	35	8,10	34,97	34,98
4.	50	7,8	49,98	49,95
5.	65	6,10	64,99	65,00
6.	80	6,8	80,00	80,00
7.	100	5	100,00	100,01
8.	120	5,7	120,01	120,01
9.	135	5,7,9,10	135,02	135,02

**Tablica 10. Izračunate vrijednosti parametara za TL VAG 01**

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost M bar	Odstupanje M-pe bar	Ponovljivost b bar	Histereza h bar
		Uzlazno bar	Silazno bar				
1	0,00	0,00	-0,18	-0,09	-0,09	-0,18	0,149
2	20,00	19,99	19,98	19,99	-0,02	-0,01	0,107
3	34,99	34,97	34,98	34,98	-0,02	0,01	0,107
4	49,99	49,98	49,95	49,97	-0,02	-0,03	0,108
5	64,98	64,99	65,00	65,00	0,02	0,01	0,107
6	79,98	80,00	80,00	80,00	0,02	0,00	0,107
7	99,98	100,00	100,01	100,01	0,02	0,01	0,107
8	119,97	120,01	120,01	120,01	0,04	0,00	0,107
9	134,97	135,02	135,02	135,02	0,05	0,00	0,108



Slika 15. Grafički prikaz mjerne nesigurnosti sa sigurnosnim razmakom  $w=0.83U$  za TL VAG 01

Točka 1:					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	$u^2$ u bar <sup>2</sup>
Etalon	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0	0	0,57737	0,00000000
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000002
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000002
suma $u^2$					0,00000844
<b><math>U_1=</math></b>					<b>0,00580862</b>

Slika 16. Prikaz izračuna mjerne nesigurnosti točke 1 za B metodu

Točka 1:	$p_1=$	0,000			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	$u^2$ u bar <sup>2</sup>
Etalon	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0	0	0,57737	0,00000000
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0,02	0,02	0,57737	0,00013334
Razlučljivost (kod električnih)	indikacija	0	0	0,2887	0,00000000
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,180	0,180	0,2887	0,00270047
Histereza	iz mjerenja	-0,180	-0,180	0,2887	0,00270047
				suma $u^2$	0,00553433
				$U_1=$	0,14878617

**Slika 17. Prikaz izračuna mjerne nesigurnosti tečke 1 za C metodu**

Iz slike 16 i slike 17 vidljivo je da u proračunu za mjernu nesigurnost prema metodi C za razliku od B nema ponovljivosti. Tome je uzrok samo dva ciklusa mjerenja prema C metodi od kojih je jedan silazni i jedan uzlazni, jer ponovljivost se računa samo za dva ciklusa istog smjera.

## 6. Određivanje klase točnosti mjerila na temelju pravila odlučivanja

Razredi točnosti za odabrana mjerila tlaka su 0,1% FS za TL VAG 01 i 0,6% FS za TL VAG 09. Za oba mjerila tlaka primijenjeno je ne binarno pravilo odlučivanja sa sigurnosnim razmakom. Raspon sigurnosnog razmaka jer određen iz tablice 2.  $w=0.83U$ . Takav raspon sigurnosnog razmaka osigurava vjerojatnost prihvatanja pogrešnog rezultata od 5%.

Rezultati za TL VAG 09 pokazuju da sve točke sa mjernim nesigurnostima osim točke 5 (1,5 bar) leže unutar linija tolerancije. Za sve točke osim točke 5 izjava o sukladnosti je prolaz dok je za toču 5 uvjetni prolaz. Izmjerena vrijednost točke 5 je nešto poviše donje tolerancijske granice te je rizik prihvatanja takvog rezultata nešto manji od 50%.

Rezultati za TL VAG 01 pokazuju da točka 1 (0 bar), točka 8 (120 bar) i točka 9 (135 bar) sa svojim mjernim nesigurnostima prelaze granice tolerancije. Izjava o sukladnosti za navedene točke je uvjetni prolaz, dok je za sve ostale prolaz. Procijenjeni rizik privaćanja kod točke 1 je oko 35%, točke 9 oko 11% te točke 8 nešto manji od 11%. S obzirom na tako veliko odstupanje točke 1 od ostalih rezultata možemo je promatrati kao pogrešno mjerenje.

Primijenjeno pravilo odlučivanja pokazuje da je klasa točnosti oba mjerila tlaka dobro određena.

---

## **7. ZAKLJUČAK**

U uvodnom dijelu ovog rada su opisane metode umjeravanja mjerila tlaka i procjene mjerne nesigurnosti. Po ILAC-G8:09/2019 opisane su metode i pravila odlučivanja mjerenih vrijednosti. U Laboratoriju za procesna mjerenja su provedena umjeravanja dva mjerila tlaka čiji su mediji bili ulje i zrak. Nakon provedenog umjeravanja određena su odstupanja i mjerene nesigurnosti dobivenih rezultata. Za dobivene rezultate provedena je analiza rizika kod određivanja klase točnosti mjerila koja je pokazala za TL VAG 09 rizik prihvatanja krivog rezultata manji od 5% za sve točke osim točke 5 čiji je rizik nešto manji od 50%. Za TL VAG 01 tri točke su pokazale mogućnost prihvatanja pogrešnog rezultata preko 5%. Najveći rizik ima točka 1 čija je ispravnost upitna s obzirom na veliko odstupanje od svih drugih točaka.

---

**LITERATURA**

- [1] DKD-R 6-1, Calibration of Pressure Gauges, 2003.
- [2] Mjeriteljstvo ukratko 3. izdanje 14. listopad 2010.
- [3] Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical manometers, EURAMET Calibration guide No.17, Version 4.00, 04/2019
- [4] ILAC-G8:09/2019, Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity
- [5] Razvoj i karakterizacija primarnog etalona tlaka, Doktorski rad, mr.sc Lovorka Grgec Bermanec ,dipl.inž. Zagreb,2006.
- [6] D. Zvizdić, L.Grgec Bermanec:Predavanja iu kolegija toplinska i procesna mjerenja(mjerenja u energetici), FSB- LPM



---

**PRILOZI**

I. CD-R disc