

Procjena mjerne nesigurnosti umjeravanja mjerila tlaka

Vidović, Vladimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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:235:543232>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vladimir Vidović

Zagreb, veljača 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**PROCJENA MJERNE
NESIGURNOSTI REZULTATA
UMJERAVANJA MJERILA
TLAKA**

Mentor:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Vladimir Vidović
0035196162

Zagreb, veljača 2017.

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

Zahvaljujem se mentorici Lovorki Grgec Bermanec na pomoći s radom i korisnim uputama. Također se zahvaljujem gospodinu Jošku Zelki koji je pomogao sa umjeravanjem mjerila tlaka u laboratoriju.

Vladimir Vidović



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: **Vladimir Vidović** Mat. br.: 0035196162

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Procjena mjerne nesigurnosti rezultata umjeravanja mjerila tlaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Estimation of measurement uncertainties for pressure gauges calibration results**

Opis zadatka:

Ovisno o deklariranom razredu točnosti, mjerila tlaka mogu se umjeravati prema tri procedure (A, B i C) koje se međusobno razlikuju prema broju ponavljanja i broju umjernih točaka.

U ovom radu potrebno je:

- Opisati metode procjene mjerne nesigurnosti.
- Dati pregled normi i uputa za umjeravanje mjerila tlaka.
- Provesti umjeravanje barem jednog mjerila prema sve 3 procedure na etalonskoj tlačnoj vagi u Laboratoriju za procesna mjerenja.
- Opisati postupak umjeravanja, korekcije i procjenu mjerne nesigurnosti.
- Napraviti predloške i računalnu podršku za provedbu ovakvog tipa umjeravanja.
- Priložiti primjere umjeravanja s pripadajućim mjernim nesigurnostima.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:
1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA	5
SAŽETAK.....	6
1. UVOD.....	7
1.1. Tlak	7
1.2. Mjerenje tlaka	7
2. METODE PROCJENE MJERNE NESIGURNOSTI	8
2.1. Mjerna nesigurnost.....	8
2.2. ISO-GUM metoda.....	8
2.3. Monte Carlo metoda.....	12
3. NORME I UPUTE ZA UMJERAVANJE MJERILA TLAKA	16
3.1. EURAMET	16
3.2.1 Upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara	16
3.2.1.1 Metode umjeravanja	16
3.2. Norme Njemačke službe za umjeravanje - Deutscher Kalibrierdienst (DKD).....	17
3.2.2 Procedure umjeravanja.....	19
3.2.3 Određivanje nesigurnosti na temelju izmjerenih vrijednosti	21
3.2.3.1 Nesigurnost ulaznih vrijednosti.....	21
3.2.4 Parametri koji utječu na nesigurnost mjerila.....	23
3.2.4.1 Rezolucija r	23
3.2.4.2 Nulto odstupanje f_0	23
3.2.4.3 Ponovljivost b'	23
3.2.4.4 Obnovljivost b	24
3.2.4.5 Histereza h	24
3.2.5 Prikaz rezultata mjerenja u potvrdi o umjeravanju	24
3.2.5.1 Grafički prikaz.....	26
4. OBAVLJENA UMJERAVANJA U LABORATORIJU ZA PROCESNA MJERENJA .	27
4.1. Tlačne vage	27
4.1.1 Princip rada	27
4.1.2 Sklop klip-cilindar.....	29
4.2. Umjeravanje tlačnog kalibratora procedurom A.....	29
4.2.1. Informacije o instrumentu	29
4.2.2. Korištena tlačna vaga	31
4.2.3. Spajanje sustava	32
4.2.4. Očitavanje vrijednosti mjernih serija.....	34
4.3. Umjeravanje mjernog instrumenta procedurom B	34

4.3.1. Informacije o instrumentu	34
4.3.2. DPI 515 kao kalibrator	35
4.3.3. Očitavanje vrijednosti mjernih serija.....	36
5. PRORAČUN NESIGURNOSTI	37
5.1. Proračun za <i>DPI 515</i> (A procedura)	37
5.1.1. Grafički prikaz	43
5.2. Proračun za <i>DPI 615</i> sa pretvornikom tlaka (B procedura).....	44
5.2.1. Grafički prikaz	50
6. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1.	Guassova raspodjela (<i>puna crna linija</i>) i <i>t</i> -distribucija s 4 stupnja slobode (<i>isprekidana crvena linija</i>)	10
Slika 2.	Pravokutna raspodjela vjerojatnosti	11
Slika 3.	Grafički prikaz A procedure	20
Slika 4.	Grafički prikaz B procedure	20
Slika 5.	Grafički prikaz C procedure	21
Slika 6.	Tablica sa očitanjima mjerenja koja se prikazuje u potvrdi o umjeravanju	25
Slika 7.	Shema tlačne vage	28
Slika 8.	DPI 515.....	30
Slika 9.	Tlačna vaga s pokazivačem tlaka	31
Slika 10.	Utezi za određivanje tlaka tlačne vage	32
Slika 11.	Prikaz spojenog sustava sa: A - DPI 515, B – boca s dušikom (150 bar), C – tlačna vaga	33
Slika 12.	Pokazivač DPI 615 sa pretvornikom tlaka	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri pojedinih raspodjela gustoće vjerojatnosti	14
Tablica 2. Parametri procedura umjeravanja.....	19
Tablica 3. raspored mjernih točaka	33
Tablica 4. Očitane vrijednosti mjernih serija A procedurom	34
Tablica 5. Očitane vrijednosti mjernih serija B procedurom	36
Tablica 6. Očitavanja mjernih serija za umjeravanje <i>DPI 515</i> (A procedura).....	42
Tablica 7. Prikaz svih mjernih točaka sa izračunatim pripadajućim nesigurnostima (A).....	42
Tablica 8. Očitavanja mjernih serija za umjeravanje <i>DPI 615</i> (B procedura).....	48
Tablica 9. Prikaz svih mjernih točaka s pripadajućom odstupanjima i nesigurnostima (B) ..	49

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_e	m^2	Efektivna površina
c_i	-	Koeficijent osjetljivosti
F	N	Sila
k	-	Faktor pokrivanja
p	bar	Tlak
p_0	bar	Tlak okoline (referentni tlak)
p_a	bar	Atmosferski tlak
p_e	bar	Efektivni tlak
p_M	bar	Manometarski tlak
R	J/(kgK)	Plinska konstanta
T	K	Termodinamička temperatura
u	bar	Standardna mjerna nesigurnost
U	bar	Proširena mjerna nesigurnost
ϑ	°C	Temperatura u °C
ϑ_a	°C	Atmosferska temperatura u °C
ρ	kg/m ³	Gustoća

SAŽETAK

Ovaj rad se bavi metodama procjene mjerne nesigurnosti, i to ISO-GUM i Monte Carlo metodi čija primjena je opisana kod umjerevanja mjerila tlaka. Definirana su oba tipa određivanja mjerne nesigurnosti ISO-GUM metode (A i B).

Opisana su dva najznačajnija postupka umjeravanja mjerila tlaka. Prvi postupak je prema EURAMET-ovim uputama, a drugi kojeg smo primijenili u laboratoriju za procesna mjerenja je opisan prema uputama njemačke službe za umjeravanje u priručniku *DKD-R 6-1*. U sklopu te metode prikazane su A, B i C procedura.

Prikazani su postupci provedenih umjeravanja za 2 mjerna uređaja (*DPI 515* i *DPI 615* sa pretvornikom tlaka) prema A i B proceduri zajedno s rezultatima umjeravanja i njihovim mjernim nesigurnostima.

Tokom rada na završnom zadatku napravljena je računalna podrška za potrebe umjeravanja i računanja mjerne nesigurnosti.

1. UVOD

1.1. Tlak

Tlak p je fizikalna veličina koja opisuje djelovanje sile na površinu, definirana omjerom sile F i površine A na koju ta sila djeluje. Mjerna jedinica je N/m^2 ili Pa (paskal, naziv dobila po francuskom fizičaru Blaiseu Pascalu). Uz Pa se koristi i bar (1 bar=100000 Pa). Mi ćemo se baviti tlakom plina koji ovisi o gustoći plina ρ , temperaturi T i plinskoj konstanti R , te se određuje jednadžbom stanja plina:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (1)$$

1.2. Mjerenje tlaka

Tlak se može mjeriti kao razlika mjerenog i referentnog tlaka. Razliku tih tlakova nazivamo manometarski tlak, a on može biti pozitivan (pretlak) ili negativan (podtlak). Uređaje koji mjere manometarski tlak zovemo manometrima. Apsolutni tlak računamo kao zbroj referentnog (tlak okoliša) i manometarskog tlaka:

$$p = p_0 + p_M \quad (2)$$

Apsolutni tlak možemo mjeriti i direktno pomoću barometara.

Izmjerene vrijednosti neće biti potpuno jednake stvarnim vrijednostima mjerenog tlaka, a razlika između stvarne i izmjerene vrijednosti će ovisiti o mjernoj nesigurnosti mjernog uređaja. Kako bismo znali njihovu nesigurnost, mjerni uređaji se umjeravaju propisanim metodama. Tim postupkom uspostavlja se odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima.

Etaloni tlaka u pravilu su visokokvalitetni tekućinski manometri i tlačne vage. Tekućinski manometri se koriste za više tlakove zbog tražene visine stupca tekućine.

2. METODE PROCJENE MJERNE NESIGURNOSTI

2.1. Mjerna nesigurnost

Sve izmjerene vrijednosti imaju pogrešku zbog koje se razlikuju od stvarne vrijednosti mjerene veličine, zbog čega uz rezultate mjerenja uzimamo u obzir i pridruženu nesigurnost.. Mjerna nesigurnost je parametar koji opisuje rasipanje vrijednosti koje se može pripisati mjerenoj veličini.

Na mjernu nesigurnost mogu utjecati:

- pogreška zbog pretpostavki mjerne metode
- osoba koja izvršava mjerenje
- djelovanje okoliša i pogreška kod mjerenja okolišnih uvjeta
- nesigurnost mjernog instrumenta
- nesigurnost referentnog etalona
- pogreška očitavanja mjerenja s analognih instrumenata
- pogreška očitavanja mjerenja zbog grube podjele skale

Zbog važnosti poznavanja mjerne nesigurnosti svi instrumenti se umjeravaju prema propisanim metodama.

Dvije najčešće korištene metode za određivanje mjerne nesigurnosti su:

- ISO-GUM metoda
- Monte Carlo metoda

Mjerna nesigurnost se osim za tlak određuje i za ostale fizikalne veličine poput mase, duljine,... Njihova mjerna nesigurnost se također određuje pomoću navedenih metoda (ISO-GUM i Monte Carlo).

2.2. ISO-GUM metoda

ISO-GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement) je metoda za izražavanje mjerne nesigurnosti mjernih instrumenata. Prema ISO-GUM metodi za više mjerenja iste veličine uz dovoljnu razlučivost mjernog instrumenta svaki put bi dobili različite mjerene vrijednosti. Raspršenost vrijednosti mjerenja nam govori koliko je mjerenje dobro izvršeno, a

njihova srednja vrijednost je procjena stvarne vrijednosti mjerene veličine. Srednja vrijednost svih mjerenja je u općem slučaju točnija od vrijednosti očitanih u pojedinačnim mjerenjima. Rezultati mjerenja ne moraju biti raspršeni oko stvarne vrijednosti, nego su raspršeni oko neke različite vrijednosti. Razlika između tih vrijednosti se naziva *sustavna* vrijednost pogreške. Pogreška osim *sustavne* može biti i *slučajna*, za koju se smatra da nastaje jer je vrijednost svakog mjerenja neke veličine različita od prethodnog. Jedno od glavnih svojstava GUM metode je mogućnost prikaza kvalitete mjerenja uzimajući u obzir i *sustavnu* i *slučajnu* pogrešku.

Za mjerenja se koriste različiti mjerni modeli, npr. za obično mjerenje tjelesne mase se koristi jednostavni model koji u obzir uzima samo jednu ulaznu varijablu (masa je proporcionalna produljenju opruge u vagi). U mnogim slučajevima se za određivanje mjerene vrijednosti uzima u obzir vrijednost više od jedne varijable (temperatura, vlažnost, tlak,...), poglavito za industrijske i znanstvene potrebe. Izmjerene vrijednosti ulaznih varijabli sadrže određenu pogrešku koja utječe na izlaznu vrijednost mjerene veličine. Utjecaj ulaznih varijabli koji se očituje na *sustavnoj* pogrešci se može procijeniti, te se onda uvodi korekcija vrijednosti prema toj procjeni. Kako bismo izmjerili neke veličine potrebne su nam i konstante fizikalnih svojstava opisane nesavršenim vrijednostima.

Izlazna varijabla, nazvana Y , čija se vrijednost traži je funkcija svih ulaznih varijabli, nazvanih X_1, X_2, \dots, X_N , čije vrijednosti mogu biti direktno izmjerene.

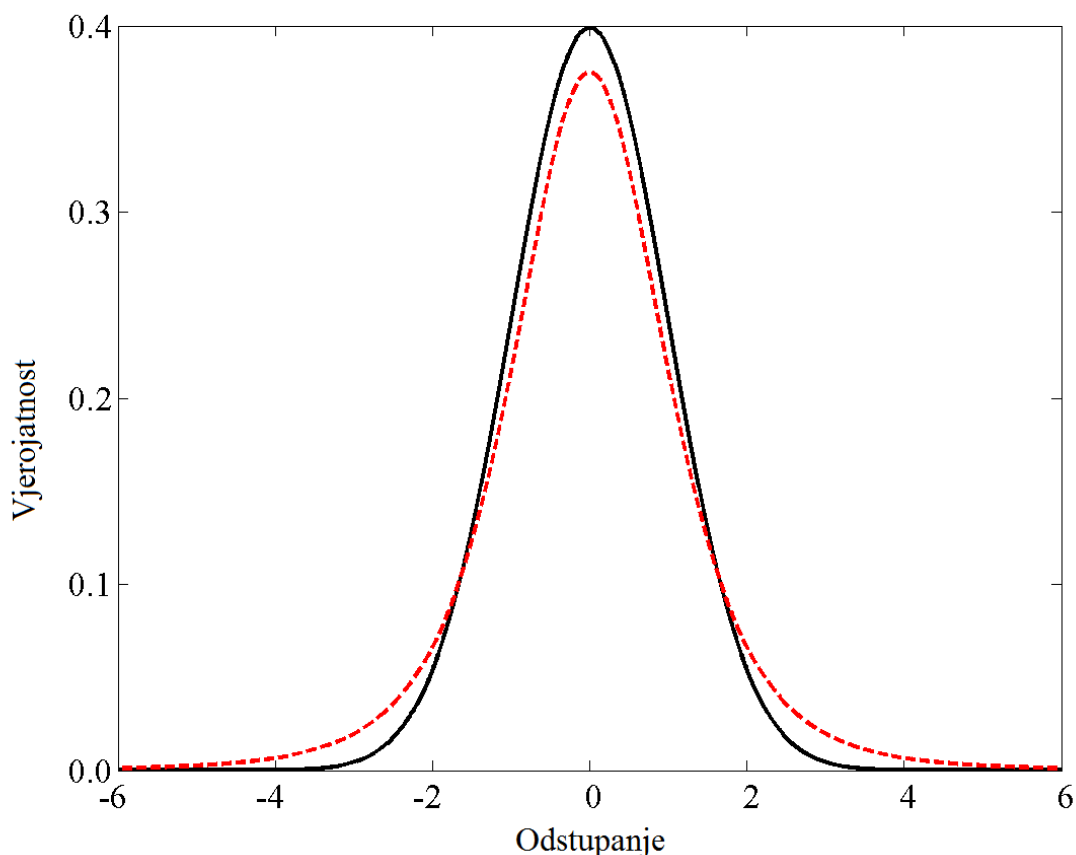
$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3)$$

Mjerna nesigurnost je prema ISO-GUM metodi definirana kao parametar apsolutne vrijednosti koji opisuje raspršenost iznosa pojedinačnih mjerenja, te se dodaje mjerenoj veličini na temelju korištenih informacija. Ulazne veličine X nam mogu biti poznate iz većeg broja dobivenih iznosa (Tip A procjene nesigurnosti), odnosno znanstvenom procjenom, na temelju iskustva, prošlih rezultata mjerenja ili nekih drugih podataka vezanih uz navedene iznose (Tip B procjene nesigurnosti).

a) A tip procjene mjerne nesigurnosti

Za A tip procjene mjerne nesigurnosti najčešće se pretpostavlja da su iznosi ulaznih veličina raspodijeljene prema Gaussovoj krivulji (*normalna raspodjela*). Za vrijednost ulazne varijable

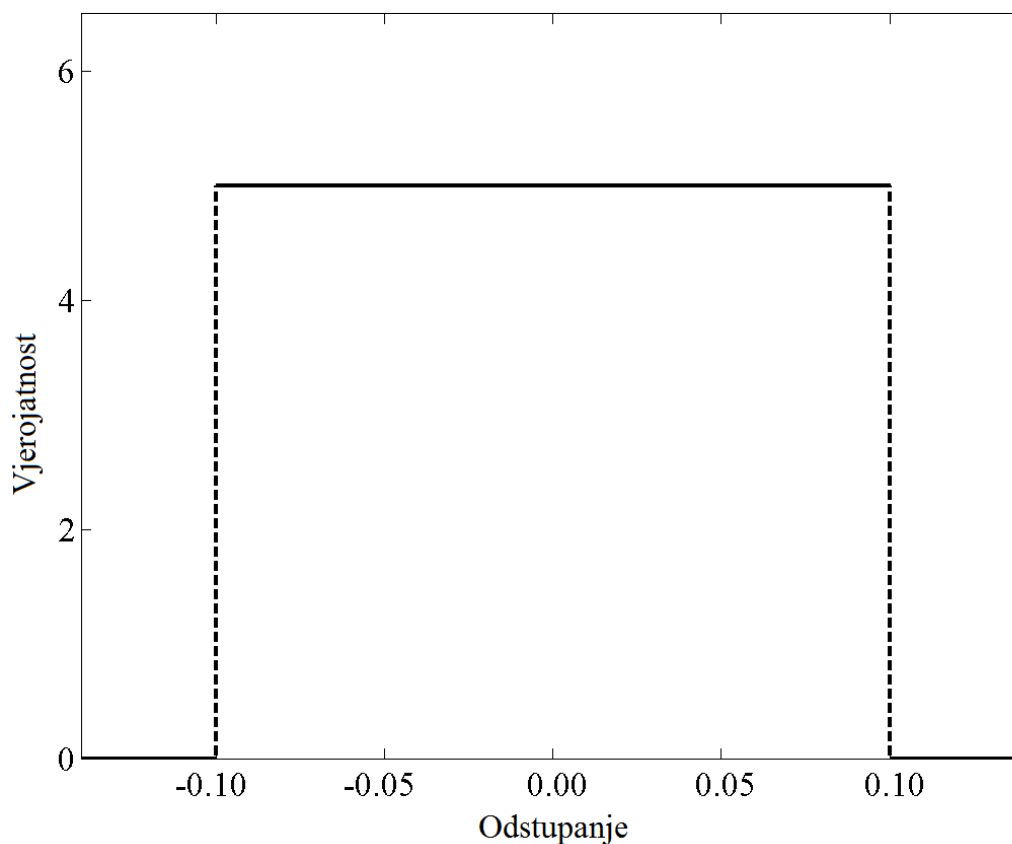
X se u tom slučaju procjenjuje da je jednaka srednjoj vrijednosti svih iznosa očitanih pojedinačno, a odstupanje je jednako odmaku od srednje vrijednosti. S porastom odstupanja iznosa od srednje vrijednosti smanjuje se vjerojatnost očitavanja te vrijednosti. Kada se nesigurnost procjenjuje iz manjeg broja očitavanja može se koristiti i t -distribucija vrijednosti s 4 stupnja slobode.



Slika 1. Guassova raspodjela (*puna crna linija*) i t -distribucija s 4 stupnja slobode (*isprekidana crvena linija*)

b) B tip procjene mjerne nesigurnosti

Za B tip mjerne nesigurnosti je često jedini podatak da rezultati X leže na određenom intervalu $[a, b]$. U tom slučajnu iznosi ulazne varijable se prikazuju pravokutnom raspodjelom vjerojatnosti sa granicama a i b . Zbog manjeg broja uzoraka mjerna nesigurnost se izračunava znanstvenom procjenom koja se zasniva na svim mogućim utjecajima na variranje vrijednosti X_i . U slučaju drugačijih podataka može se koristiti i neka druga raspodjela (Gaussova, trokutasta, ...).



Slika 2. Pravokutna raspodjela vjerojatnosti

Kada su sve ulazne varijable X_1, \dots, X_N opisane prikladnim raspodjelama vjerojatnosti i prikladnim mjernim modelom, raspodjela vjerojatnosti mjerene izlazne vrijednosti je potpuno definirana kao procijenjena srednja vrijednost y sa standardnim odstupanjem koje se smatra mjernom nesigurnosti $u(y)$.

Faze procjene mjerne nesigurnosti:

a) Faza formuliranja

- određivanje mjerene veličine Y
- određivanje ulaznih veličina X koje utječu na Y
- razvoj mjernog modela koji povezuje Y sa ulaznim veličinama X
- prema dostupnim podacima primjenjuje se odgovarajuća raspodjela vjerojatnosti (*Gaussovu, pravokutnu, ...*) za opisivanje ulaznih veličina X

b) Faza proračuna

- određivanje vrijednosti mjerene veličine Y , prikazane procjenom y
- određivanje standardnog odstupanja vrijednosti Y , koje predstavlja nesigurnost $u(y)$
- prikaz intervala koji opisuje vrijednost mjerene veličine Y i pripadajuću nesigurnost sa raspodjelom vjerojatnosti

U rezultatima mjerenja se navodi mjerena vrijednost Y sa proširenom nesigurnosti $U(Y)$. Ona se dobije kada standardnu nesigurnost u množimo s faktorom pokrivanja k :

$$U(Y) = u(y) \cdot k \quad (4)$$

Za $k=2$ kod normalne raspodjele vjerojatnost pokrivanja je $p=95\%$, a za $k=3$ vrijedi $p=99\%$.

ISO-GUM metoda je primjenjiva kad su nam ulazne veličine X međusobno zavisne. Ako nam je ovisnost mjerene veličine Y ovisna o ulaznim varijablama X , a raspodjela vrijednosti na ulazu normalna, GUM metoda nam daje pouzdane rezultate mjerenja. U nekim situacijama GUM metoda određivanja mjerne nesigurnosti neće biti dovoljno pouzdana, poput:

- funkcija ovisnosti mjerene vrijednosti Y o ulaznim varijablama X nije linearna
- raspodjela vjerojatnosti ulaznih varijabli X nije simetrična
- raspodjela vjerojatnosti iznosa mjerene veličine nije simetrična ili se ne podudara sa Gaussovom ili t -raspodjelom

U takvim slučajevima se primjenjuju druge metode procjene mjerne nesigurnosti, poput *Monte Carlo* metode.

2.3. Monte Carlo metoda

Monte Carlo metoda koristi matematički model mjerenja koji povezuje izlaznu veličinu mjerenja s ulaznim veličinama funkcijom:

$$Y = f(X_1, \dots, X_N) \quad (5)$$

Ulazne veličine X_1, \dots, X_N smatraju se slučajnim varijablama s očekivanjima x_1, \dots, x_N i mogućim vrijednostima ζ_1, \dots, ζ_N . Izlazna veličina Y je slučajna varijabla s očekivanjem y i mogućim vrijednostima η .

Faze procjene mjerne nesigurnosti:

a) Faza formuliranja

- određivanje mjerene veličine Y
- određivanje ulaznih veličina X koje utječu na Y
- razvoj modela koji povezuje Y sa ulaznim veličinama X
- prema dostupnim podacima dodjeljuju se odgovarajuća funkcije gustoće vjerojatnosti G_X (*Gaussova, pravokutna, ...*) za opisivanje ulaznih veličina X

b) Faza prijenosa

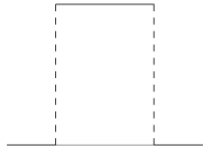
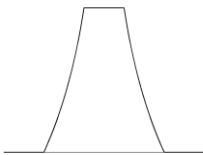
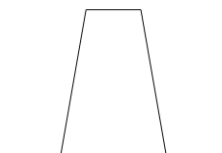
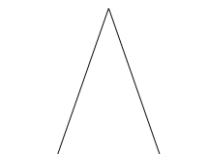

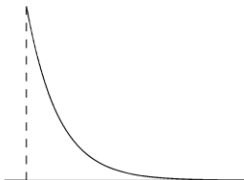
- funkcija gustoće vjerojatnosti G_X ulaznih varijabli X se prenosi kroz razvijeni model kako bismo dobili funkciju gustoće vjerojatnosti G_Y izlazne veličine Y

c) Pojednostavljeno prikazivanje Y pomoću njene funkcije gustoće vjerojatnosti

- očekivana izlazna veličina Y , prikazana kao njena procjena y
- standardno odstupanje izlazne varijable Y , prikazano kao standardna mjerna nesigurnost $u(y)$
- interval pokrića koji sadrži izlaznu veličinu Y sa definiranom vjerojatnosti

Monte Carlo metoda se koristi za fazu prijenosa i pojednostavljenog prikazivanja mjerene veličine. MCM nudi opći pristup za približni numerički prikaz funkcije raspodjele vjerojatnosti G , poput raspodjele vjerojatnost $G_Y(\eta)$ za izlaznu mjerenu veličinu. Funkcije raspodjele vjerojatnosti mogu biti normalne (Gaussove), pravokutne, trokutaste, eksponencijalne, ..., te su opisane u *Tablici 1*.

Tablica 1. Primjeri pojedinih raspodjela gustoće vjerojatnosti

Dostupni podaci	Funkcija gustoće vjerojatnosti	Slika
Donja i gornja granica a i b	Pravokutna: $R(a, b)$	
Donja i gornja granica koje nisu točno određene $a \pm d, b \pm d$	Zakrivljena trapezna: $CTrap(a, b, d)$	
Zbroj dviju veličina kojima su dodijeljene pravokutne razdiobe s donjim a_1, b_1 i gornjim granicama a_2, b_2	Trapezna: $Trap(a, b, \beta)$ uz: $a = a_1 + a_2$, $b = b_1 + b_2$, $\beta = (b_1 - a_1) - (b_2 - a_2) / (b - a)$	
Zbroj dviju veličina kojima su dodijeljene pravokutne razdiobe s donjim a_1, b_1 i gornjim granicama a_2, b_2 i s istom poluširinom ($b_1 - a_1 = b_2 - a_2$)	Trokutasta: $T(a, b)$ uz: $a = a_1 + a_2$, $b = b_1 + b_2$	
Najbolja procjena x i pridružena standardna nesigurnost $u(x)$	Normalna (Gaussova): $N(x, u^2(x))$	
Najbolja procjena x apsolutne veličine	Eksponencijalna: $Ex(1/x)$	

MCM može se opisati kao postupak kroz sljedeće korake:

- a) odabere se broj M pokusa Monte Carlo koje je potrebno izvesti
- b) uzorkovanjem se generira M vektora iz dodijeljenih funkcija gustoće vjerojatnosti kao ostvarenja (skupa od N) ulaznih veličina X_i
- c)) za svaki takav vektor odredi se odgovarajuća vrijednost modela Y čiji je rezultat M vrijednosti modela
- d) tih M vrijednosti modela razvrsta se strogo rastućim redom, uporabom tih razvrstanih vrijednosti modela dobiva se prikaz G
- e) prikaz G upotrebljava se za određivanje procjene y izlazne veličine Y i standardne nesigurnosti $u(y)$ pridružene procjeni y
- f) prikaz G upotrebljava se za određivanje odgovarajućeg intervala pokrivanja izlazne veličine Y za dogovorenu vjerojatnost pokrivanja p

Pouzdanost MCM metode za određivanje izlazne veličine Y sa njenom procjenom y i nesigurnosti $u(y)$ ovisi o broju pokusa M (korak a). Broj pokusa M se odabire na način da bude znatno veći od vrijednosti $1/(1-p)$, tj. barem:

$$M > 10^4 \cdot \frac{1}{1-p} \quad (6)$$

Tada se može očekivati pouzdan prikaz funkcije raspodjele G_Y izlazne veličine s razinom povjerenja p .

3. NORME I UPUTE ZA UMJERAVANJE MJERILA TLAKA

3.1. EURAMET

EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) je regionalna mjeriteljska organizacija u Europi koja koordinira suradnju europskih nacionalnih instituta za mjeriteljstvo u područjima poput mjeriteljstva, sljedivosti mjera, međunarodne prepoznatljivosti nacionalnih mjeriteljskih standarada.

Zadatak EURAMET-a je razviti i raširiti integriranu, efikasnu i međunarodno konkurentnu mjeriteljsku infrastrukturu za Europu, ne zanemarujući potrebe industrije, poslovanja i predstavnika država. EURAMET je zaslužan za provođenje *europskog mjeriteljskog istraživačkog programa (EMRP)* i *Europskog mjeriteljskog programa za inovacije i razvoj (EMPIR)* koji su smišljeni kako bi potaknuli suradnju između nacionalnih instituta za mjeriteljstvo i industrije ili akademskih ustanova.

3.2.1 Upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara

EURAMET-ove upute prema vodiču *cg-17* se odnose na sljedeća mjerila tlaka:

- pretvornike tlaka
- transmitere tlaka
- manometra s digitalnim ili analognim prikazom mjerene veličine

Prije umjeravanja se mora osigurati da je mjerni uređaj u temperaturnoj ravnoteži sa okolišem (zrakom u laboratoriju), te da je čist. Umjeravani uređaj bi trebao biti što bliže etalonskom uređaju. Za vrijeme umjeravanja treba se obratiti pozornost na proizvođačeve upute o rukovanju mjernim uređajem.

EURAMET-ove upute za umjeravanje mjernu nesigurnost određuju na temelju ISO-GUM metode.

3.2.1.1 Metode umjeravanja

Zadatak odabrane metode je prikazati vrijednosti histereze, linearnosti i ponovljivosti mjernog uređaja prema zahtjevima klijenta. Odabir procedure ovisi o očekivanoj preciznosti instrumenta.

a) Osnovna procedura umjeravanja

Osnovna procedura umjeravanja se provodi ako je očekivana nesigurnost uređaja (za $k=2$) U veća od 0,2%. Umjeravanje se provodi u šest mjernih točaka, uzlaznim i silaznim redoslijedom, a ponovljivost se procjenjuje na temelju tri ponovljena mjerenja, preferirano na 50% mjerne skale.

b) Standardna procedura umjeravanja

Standardna procedura umjeravanja se provodi ako je očekivana mjerna nesigurnost uređaja ($k=2$) U veća od 0,05% i manja od 0,2%. Umjeravanje se provodi u jedanaest mjernih točaka uzlaznim i silaznim redoslijedom, a ponovljivost se procjenjuje na temelju tri ponovljena mjerenja u četiri mjerne točke, preferirano 20%, 40%, 60% i 80% mjerne skale.

c) Opsežna procedura mjerenja

Opsežna procedura mjerenja se provodi ako je očekivana mjerna nesigurnost uređaja ($k=2$) U manja od 0,05%. Umjeravanje se provodi kroz jedanaest mjernih točaka, u 3 mjerne serije.

3.2. Norme Njemačke službe za umjeravanje - Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

DKD je akreditirao i nadzirao kalibracijske laboratorije za industrijska poduzeća, istraživačke institute, institucije za testiranja i inspekcije do 1. siječnja 2010. godine, a od tad je tu odgovornost preuzeo DAkkS (Njemačko državno tijelo za akreditacije).

DKD je autor značajnih normi i uputa za umjeravanje mjerila tlaka, tako u svojoj direktivi *DKD-R 6-1: Umjeravanje mjerila tlaka* opisuju postupak umjeravanja mjerila tlaka. U njoj su opisane tri procedure umjeravanja:

- A procedura
- B procedura
- C procedura

Vrste mjerila tlaka koje ova direktiva obuhvaća su:

- a) Mjerila tlaka s Bourdonovom cijevi
- b) Električna mjerila tlaka:

Kod navedenih uređaja mjereni tlak p je ulazni signal kojeg on pretvara u električni signal definiran naponom U , jakosti električne struje I ili frekvencijom signala f . Takva mjerila tlaka odmah na temelju dobivenog električnog signala određuju i prikazuju vrijednost mjerenog tlaka.

c) Pretvornici tlaka s električnim izlazom:

Pretvornicima tlaka je ulazni signal mjereni tlak p kojeg on pretvara u izlazni električni signal definiran naponom U , jakosti električne struje I ili frekvencijom signala f . Takvim mjerilima tlaka je potreban dodatni uređaj za određivanje i prikaz mjerenog tlaka, za razliku od *električnih mjerila tlaka (b)*.

Prije umjeravanja treba se provjeriti umjerljivost instrumenta, tj. da li je stanje mjernog instrumenta prihvatljivo za korištenje i sukladno s tehničkom dokumentacijom proizvođača. Umjerljivost instrumenta se utvrđuje provjerom vanjštine instrumenta i funkcijskim testom.

Za vanjštinu se provjerava:

- moguća vidljiva oštećenja
- količina onečišćenja
- čitljivost prikaza mjerene veličine i natpisa
- provjera dokumentacije potrebne za kalibraciju

Provjera funkcionalnosti:

- zabrtvljenost cijevnog sustava
- električna funkcija
- ispravan rad alata za upravljanje mjernim sustavom (releji, ventili i sl.)

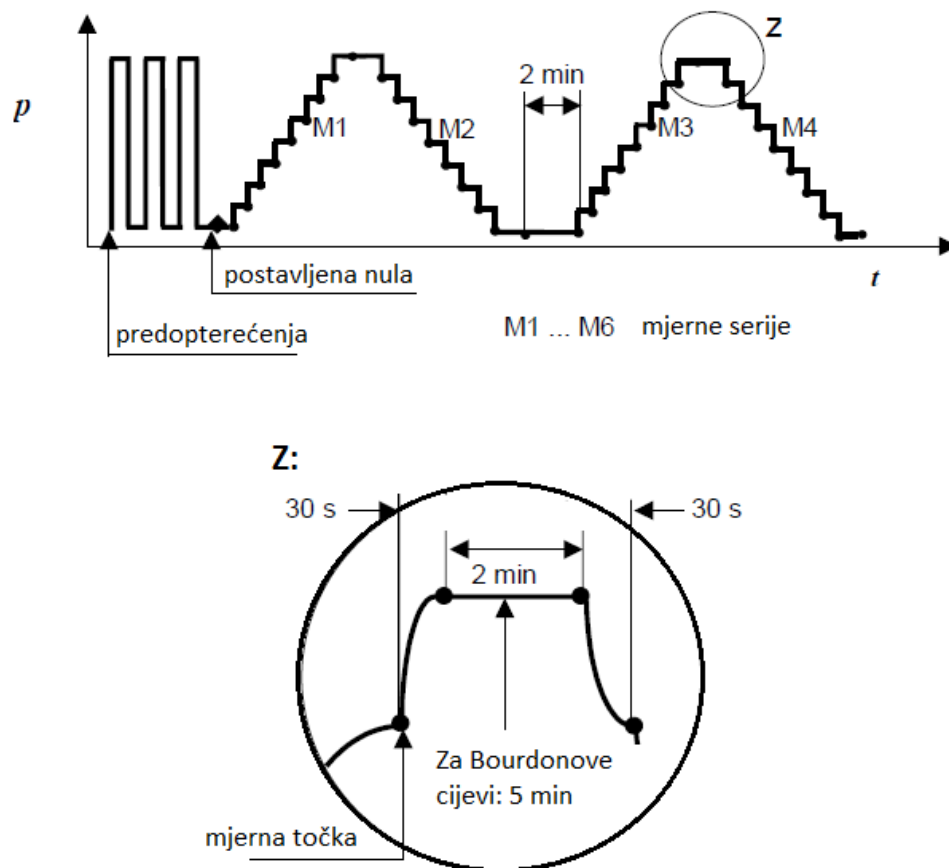
Atmosferski uvjeti se moraju uzeti u obzir, te umjeravanje mora biti izvršeno u okolišu stabilne temperature koja ne varira više od 1 °C i koja mora biti između 18 i 28 °C. Temperatura okoliša se provjerava tokom cijelog umjeravanja mjerila tlaka, a isto vrijedi i za atmosferski tlak i vlažnost zraka ako utječu na rezultate umjeravanja.

3.2.2 Procedure umjeravanja

Mjerilo tlaka koje umjeravamo se spaja na kontrolirani izvor tlaka zajedno sa etalonskim mjerilom tlaka sa poznatom točnosti i sljedivosti kako bismo znali vrijednost tlaka u sustavu. Mjerenja se sastoje od većeg broja očitavanja vrijednosti tlaka etalona i umjeravanog instrumenta kako bismo odredili njegovu nesigurnost. Očitavanja tlaka trebaju biti raspoređena u mjernim točkama kroz cijelo mjerno područje instrumenta kojeg umjeravamo. Mjerenja se obavljaju kroz uzlazne i silazne mjerne serije koje prolaze mjernim točkama. Broj mjernih serija i mjernih točaka ovisi o odabranoj proceduri umjeravanja. Kod postupka umjeravanja prije očitavanja mjernih serija mjerilo se treba predopteretiti na najveći iznos tlaka njegovog mjernog područja. Broj predopterećenja također ovisi o odabranoj proceduri umjeravanja, a njihovo trajanje i period između njih bi trebao biti barem 30 sekundi. Nakon obavljenih predopterećenja i postizanja stacionarnog stanja u sustavu podešava se nulto stanje instrumenta, te se odmah očitava tlak prve mjerne točke (0 bar). Periodi između promjena tlaka u sustavu i njihovog očitavanja bi trebali biti svaki put jednaki i trajati barem 30 sekundi kako bi se tlak potpuno ustalio. Za najveću vrijednost mjernog područja se tlak očitava dva puta, kao zadnja mjerna točka uzlazne mjerne serije, te nakon perioda čekanja od barem 2 min kao prva mjerna točka iduće silazne mjerne serije. Broj mjernih točaka i ostale pojedinosti za svaku mjernu proceduru je prikazan u Tablici 2.

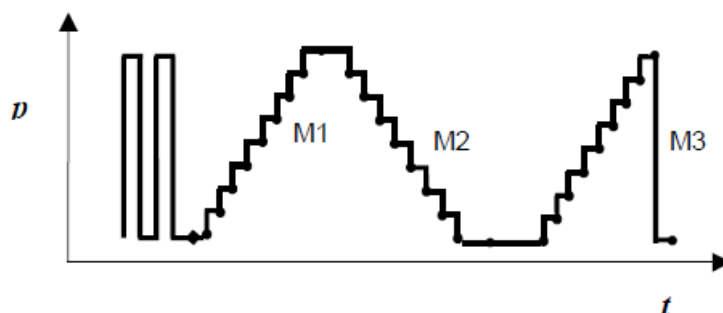
Tablica 2. Parametri procedura umjeravanja

Procedura umjeravanja	Očekivana mjerna nesigurnost (udio mjernog područja)	Broj mjernih točaka (uključujući nulu)	Broj predopterećenja	Broj mjernih serija	
				Uzlazne	Silazne
A	< 0,1	9	3	2	2
B	0,1 ... 0,6	9	2	2	1
C	> 0,6	5	1	1	1

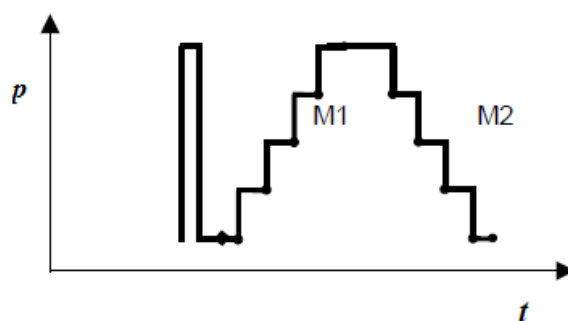


Slika 3. Grafički prikaz A procedure

Kod A procedure uz četiri mjerne serije mogu se napraviti još dvije (jedna ulazna i jedna silazna) ako je potrebno.



Slika 4. Grafički prikaz B procedure



Slika 5. Grafički prikaz C procedure

3.2.3 Određivanje nesigurnosti na temelju izmjerenih vrijednosti

Mjerna nesigurnost se u DKD-ovim uputama određuje na temelju ISO-GUM metode kao i u slučaju EURAMET-ovih uputa.

Određuje se standardna nesigurnost za svaku ulaznu veličinu $u(x_i)$ te ju se množi sa pripadajućim faktorom osjetljivosti c_i

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (7)$$

Ukupna standardna nesigurnost se računa prema sljedećoj formuli:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (8)$$

Konačno, očekivanu nesigurnost $U(y)$ dobijemo nakon što ukupnu standardnu nesigurnost $u(y)$ pomnožimo s faktorom pokrivanja k :

$$U(y) = k \cdot u(y) \quad (9)$$

Očekivanu mjernu nesigurnost $U(y)$ određujemo za tlakove svih mjernih točaka.

3.2.3.1 Nesigurnost ulaznih vrijednosti

Procjena mjerne nesigurnosti ulaznih vrijednosti je podjeljena u dvije kategorije:

a) Tip A

Koristi se za određivanje standardne nesigurnosti $u(x_i)$ kad imamo statističke rezultate za mjerne serije i normalnu raspodjelu ulaznih vrijednosti.

b) Tip B

Određivanje vrijednosti standardne nesigurnosti $u(x_i)$ se zasniva na znanstvenoj procjeni nastaloj iz sljedećih podataka:

- podaci prijašnjih mjerenja
- općenito poznavanje i iskustvo vezano uz svojstva i ponašanje mjernih instrumenata i materijala
- specifikacije proizvođača
- potvrde o umjeravanju i ostali certifikati
- referentni podaci iz priručnika

Često je jedini poznati podatak umjeravanja interval sa granicama a_+ i a_- , unutar kojeg su jednake vjerojatnosti za pojavu svih očitavanja. U tom slučaju imamo pravokutnu raspodjelu ulaznih podataka (Slika 2).

Procijenjena vrijednost je srednja vrijednost koja se računa prema formuli:

$$x_i = \frac{1}{2} \cdot (a_+ + a_-) \quad (10)$$

Definiramo parametar a kao:

$$2 \cdot a = a_+ - a_- \quad (11)$$

Pomoću a određujemo nesigurnost $u(x_i)$ ovisno o funkciji gustoće vjerojatnosti ulaznih vrijednosti:

- za pravokutnu funkciju gustoće vjerojatnosti

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

- za trokutastu funkciju gustoće vjerojatnosti

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (13)$$

- za funkciju U-oblika gustoće vjerojatnosti

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

3.2.4 Parametri koji utječu na nesigurnost mjerila

3.2.4.1 Rezolucija r

- a) Analogni prikaz

Rezolucija r za analogne instrumente je određena podjelom analogne skale

- b) Digitalni prikaz

Rezolucija r za digitalne uređaje je određena brojem decimala koje prikazuje, a da se prikazani iznos ne mijenja za više od jednog koraka najmanje decimale u neopterećenom stanju.

3.2.4.2 Nulto odstupanje f_0

Nulta točka (tlak za koji je očitavanje 0) može biti postavljena prije svakog mjernog ciklusa koji sadrži uzlazne i silazne mjerne serije i mora biti očitana prije i poslije svakog ciklusa. Vrijednost nulte točke se očitava kad je instrument potpuno neopterećen.

Nulto odstupanje se računa prema sljedećoj formuli:

$$f_0 = \max\{|x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|, |x_{6,0} - x_{5,0}|\} \quad (15)$$

3.2.4.3 Ponovljivost b'

Određuje se prema:

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

$$b'_{down,j} = |(x_{4,j} - x_{4,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})| \quad (16)$$

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

3.2.4.4 Obnovljivost b

Određuje se prema:

$$\begin{aligned}b_{up,j} &= |(x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| \\b_{down,j} &= |(x_{6,j} - x_{6,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})| \\b_{mean,j} &= \max\{b_{up,j}, b_{down,j}\}\end{aligned}\tag{17}$$

3.2.4.5 Histereza h

Određuje se prema:

$$\begin{aligned}h_{mean,j} &= \frac{1}{n} \cdot \{ |(x_{2,j} - x_{1,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| \\ &\quad + |(x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{3,j} - x_{3,0})| \\ &\quad + |(x_{6,j} - x_{5,0}) - (x_{5,j} - x_{5,0})| \}\end{aligned}\tag{18}$$

3.2.5 Prikaz rezultata mjerenja u potvrdi o umjeravanju

U potvrdi o umjeravanju se navodi:

- Metoda umjeravanja (DKD-R 6-1 procedura A, B, C)
- Radni medij
- Informacije o umjeravanom instrumentu
- Pozicija umjeravanog uređaja prilikom umjeravanja

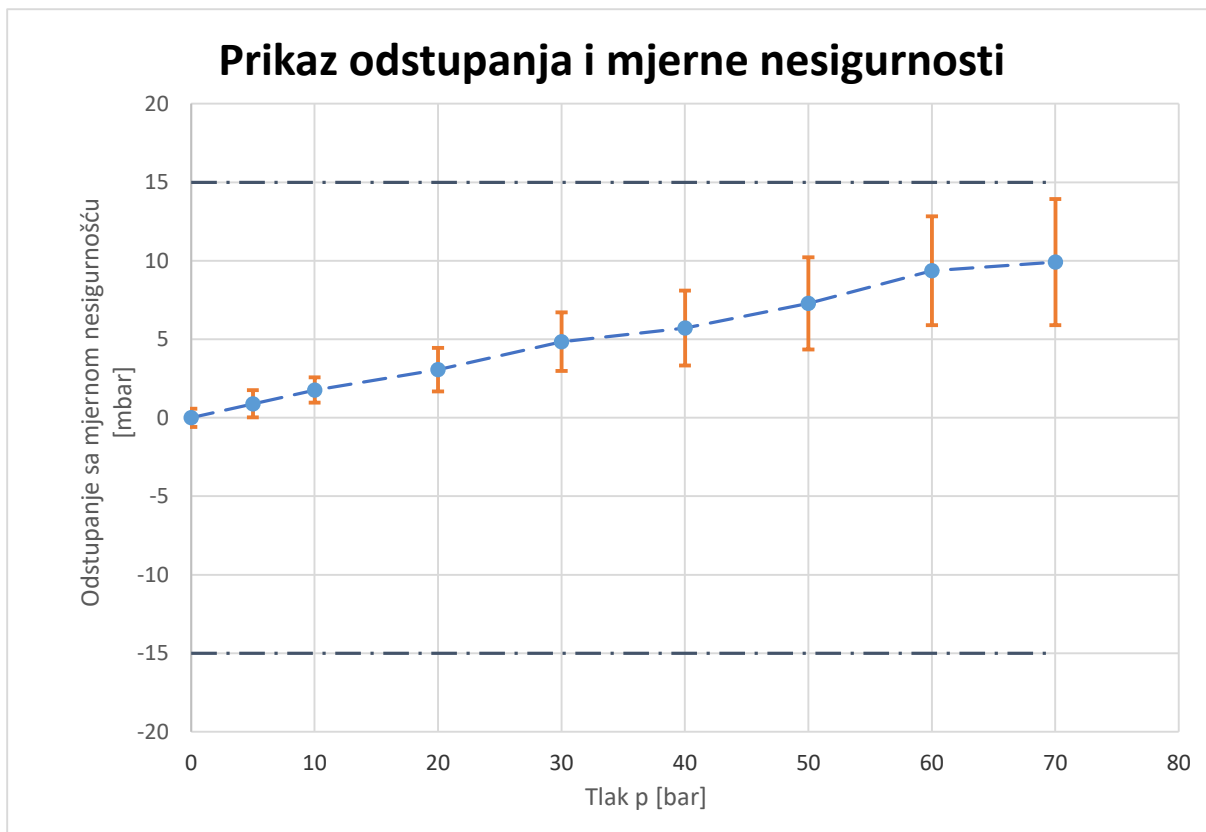
Tlak p_{standard}	Očitana vrijednost mjerenja p_{ind}					
	Procedura umjeravanja A				Dodatne mjerne serije	
	Procedura umjeravanja B					
	Procedura umjeravanja C					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
bar, Pascal, ...	bar, Pascal, A, V, mV/V, Hz, ...					
min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.
↓	↓	↑	↓	↑	↓	↑
max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.

Slika 6. Tablica sa očitanjima mjerenja koja se prikazuje u potvrdi o umjeravanju

U prvom stupcu tablice sa slike 6. se upisuju vrijednosti tlaka očitano na mjerilu koje koristimo kao etalon. Ostale kolone prikazuju mjerne serije od M1 do M6 ovisno o proceduri. Mjerna jedinica ovisi o umjeravanom mjerilu (Bourdonova cijev, električno mjerilo tlaka, pretvornik tlaka), tj. o njegovoj izlaznoj veličini.

3.2.5.1 Grafički prikaz

Koristi se kako bi što jasnije i jednostavnije prikazali rezultate umjeravanja i može se prikazati pomoću raznih dijagrama.



Dijagram 1. Primjer dijagrama iz umjeravanja kalibratora DPI 515 navedenog u nastavku

4. OBAVLJENA UMJERAVANJA U LABORATORIJU ZA PROCESNA MJERENJA

Obavili smo dva umjeravanja mjernih uređaja, oba prema uputama iz *DKD-R 6-1*, od čega jedno prema A proceduri, a drugo prema B proceduri. Prvo smo umjerali tlačni kalibrator *DPI 515*, čiji je proizvođač *Druck*, pomoću tlačne vage u vlasništvu laboratorija za procesna mjerenja, FSB, koja je sljediva prema njemačkom nacionalnom mjeriteljskom institutu *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)* u Braunschweigu. Nakon toga smo koristili tlačni kalibrator kako bismo umjerali električni pokazivač tlaka *DPI 615* sa pripadajućim tlačnim pretvornikom.

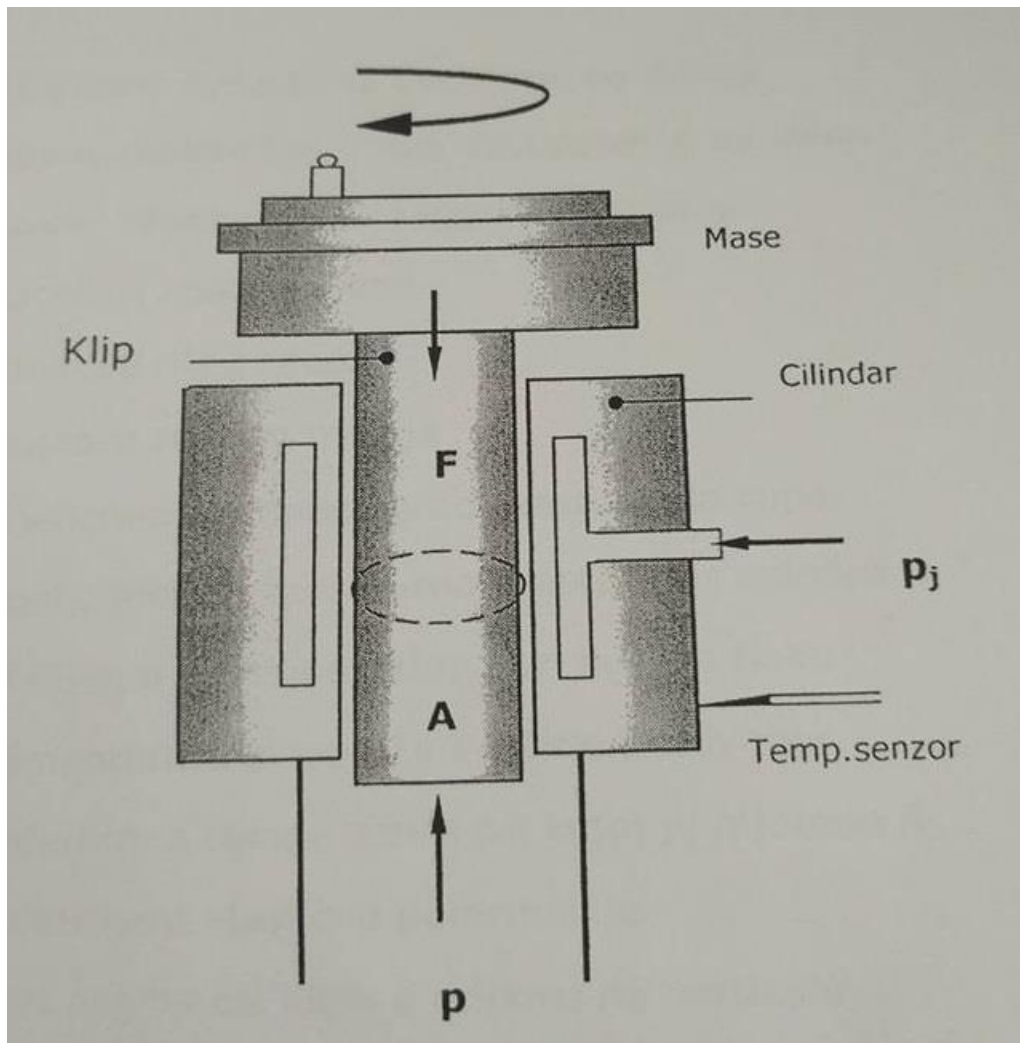
4.1. Tlačne vage

Prve oblici tlačnih vaga su se pojavili prije otprilike 150 godina. To su bili uređaji koji su generirali tlak kao djelovanje sile na poznatu površinu. Razvoj tlačnih vaga je pratio rast primjene parnih strojeva u industriji i potrebu razumijevanja termodinamičkih svojstava plinova i tekućina na različitim temperaturama i tlakovima.

Današnje tlačne vage se koriste kao etaloni za umjeravanje ostalih instrumenata jer imaju najmanju nesigurnost uz visokokvalitetne tekućinske manometre. Radni medij tlačnih vaga može biti plin (najčešće dušik) ili kapljevina (ulje ili voda) ovisno o mjernim područjima. Plinske tlačne vage se obično koriste za tlakove do 140 bar, vodene do 700 bar, a uljne sve i do 4000 bar.

4.1.1 Princip rada

Princip rada se temelji na zakonu promjene hidrostatičkog tlaka. Sklop se sastoji od precizno izrađenog klipa umetnutog u blisko prilagođeni cilindar (Slika 7), oboje poznatih površina popriječnih presjeka. Ta dva elementa određuju *efektivnu površinu*. Mase poznate težine se postavljaju na vrh slobodnog klipa čija masa se također uzima u obzir. Na donji kraj klipa dovodi se fluid pod tlakom, najčešće dušik ili bijelo ulje, sve dok se ne razvije dovoljna sila za podizanje klipa s utezima. Kada klip slobodno rotira unutar cilindra vaga je u ravnoteži s nepoznatim tlakom fluida u sustavu.



Slika 7. Shema tlačne vage

Nakon što smo ustanovili da su vaga i tlak u ravnoteži možemo izračunati vrijednost efektivnog tlaka kao omjer sile i efektivne površine:

$$p_e = \frac{F}{A_e} \quad (19)$$

Gdje za silu F osim mase utega se moraju uzeti i drugi parametri poput sile uzgona na utege. Isto vrijedi i za efektivnu površinu A_e za koju se mora uzeti u obzir elastična deformacija klipa i cilindra zbog temperaturnog rastezanja materijala i djelovanja tlaka fluida.

4.1.2 Sklop klip-cilindar

Sklop klip-cilindar je glavni dio svake tlačne vage, a glavni zahtjevi za njegovu izradu su:

- materijal sa malim koeficijentom temperaturne ekspanzije 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)

4.2. Umjeravanje tlačnog kalibratora procedurom A

4.2.1. Informacije o instrumentu

Proizvođač: Druck

Tvornički broj: 51502404

Tip: DPI 515

Mjerno područje: 0 – 2 bar i 0 – 150 bar

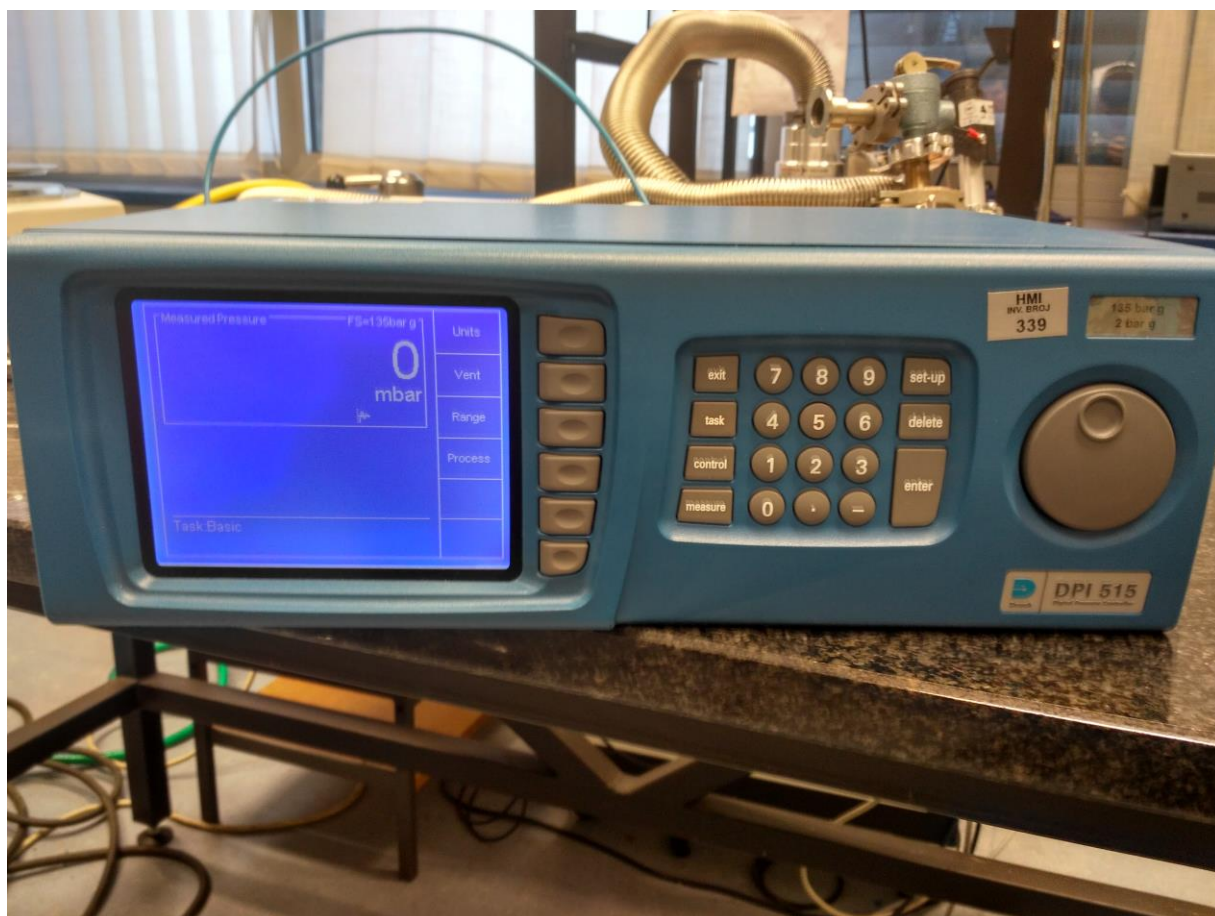
Vlasnik mjerila: FSB – LPM

Razred točnosti 0,01 %

Dopušteno odstupanje: 0,015 bar

Podjela skale: 0,001 bar

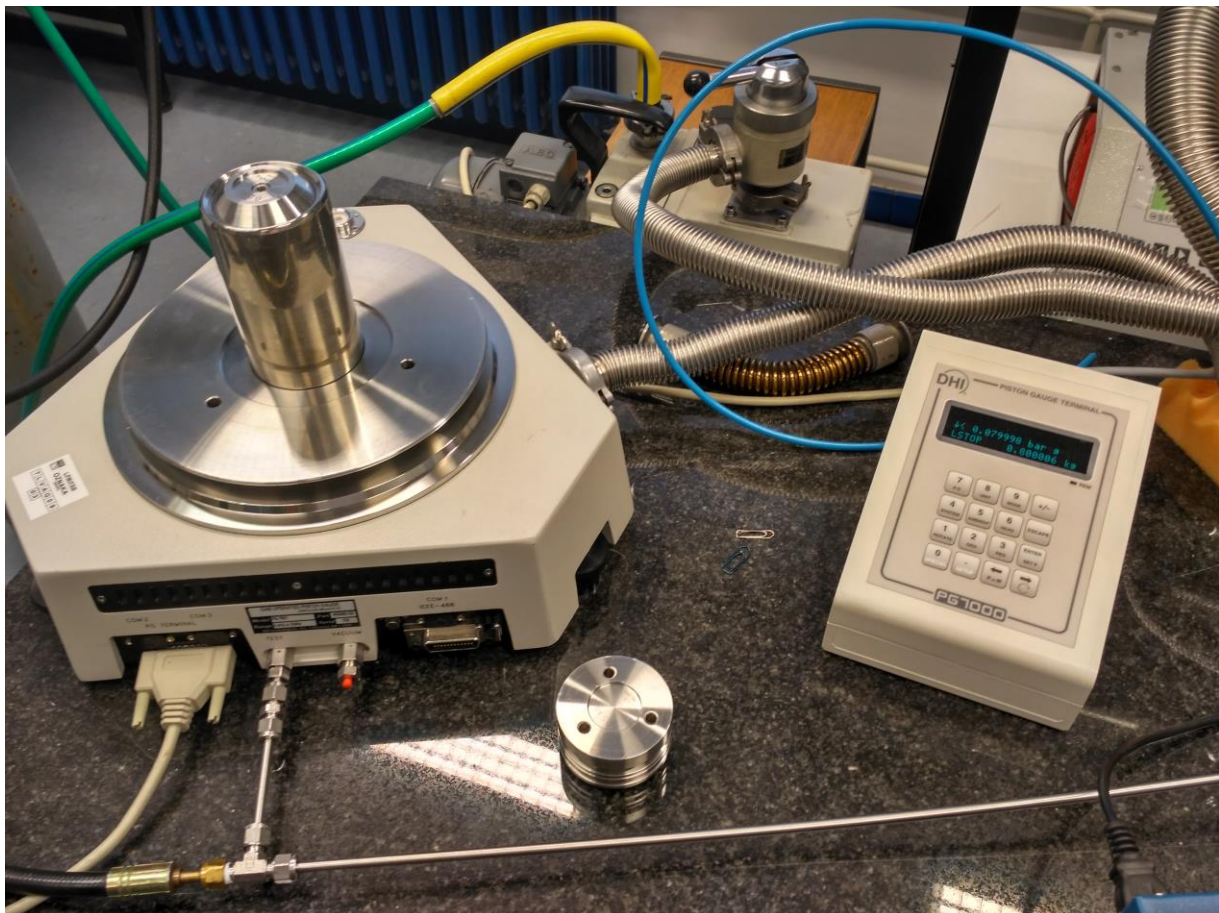
Navedeni instrument se može koristiti za mjerenje tlaka, ali glavna namjena mu je da ga se koristi kao kalibrator koji bi umjeravao ostale instrumente. Može raditi sa dva različita mjerna područja, od 0 do 2 bar, te od 0 do 150 bar.



Slika 8. DPI 515

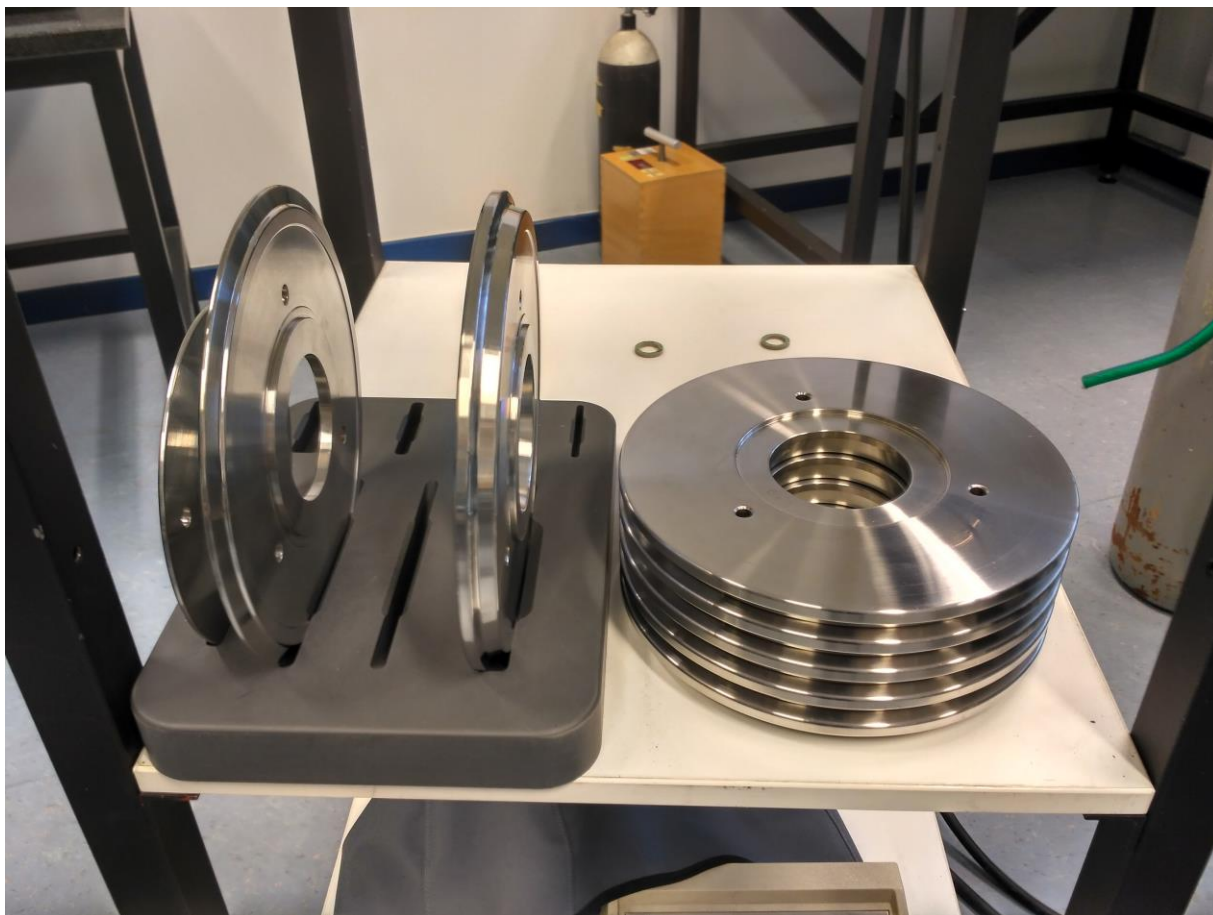
4.2.2. Korištena tlačna vaga

Za umjeravanje kalibratora DPI 515 smo koristili tlačnu vagu sa mjernim područjem do 70 bar. Tlačna vaga dolazi sa pripadajućim pokazivačem tlaka (Slika 9). Nesigurnost tlačne vage kao etalone je procjenjena na $0,5 * 10^{-4}$.



Slika 9. Tlačna vaga s pokazivačem tlaka

Za određivanje tlaka na tlačnoj vagi su korišteni utezi od 5 kg (prirast tlaka od približno 10 bar), 2 kg, 0,2 kg 0,1 kg i osnovni uteg(Slika 10).



Slika 10. Utezi za određivanje tlaka tlačne vage

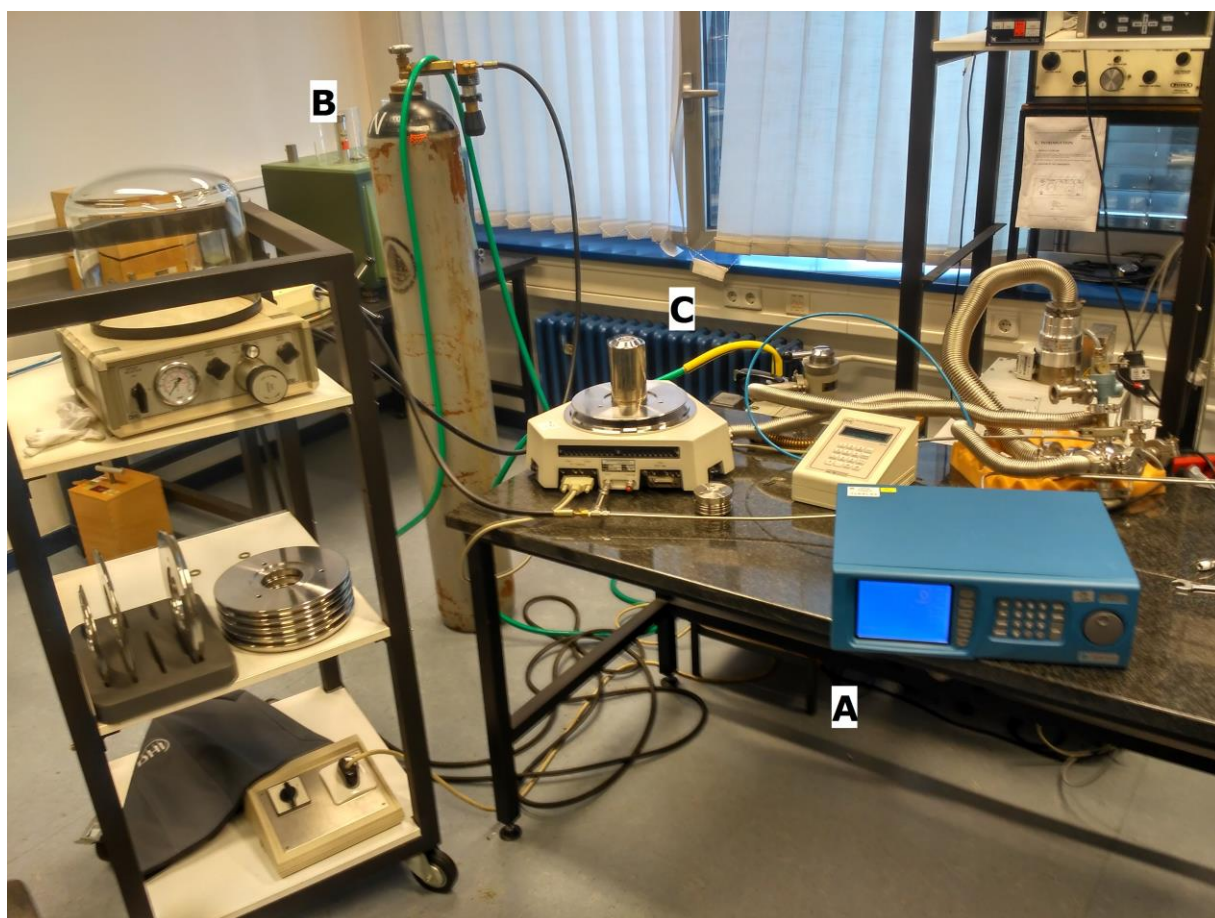
4.2.3. Spajanje sustava

Kako bismo umjerali *DPI 515* spojili smo ga zajedno s tlačnom vagom poznate mjerne nesigurnosti na radni medij kontroliranog tlaka. Korišteni medij je bio dušik, čistoće 99,999 %. Iako je mjerno područje instrumenta *DPI 515* koje smo umjeravali do 150 bar, bili smo ograničeni tlačnom vagom i nedovoljnom masom utega, pa je maksimalni postignuti tlak pri umjeravanju bio 70 bar. Mase utega su nam bile poznate, kao i površina sklopa klip-cilindar, pa smo lako izračunali efektivne tlakove. Za mjerne serije smo uzeli točke s tlakovima:

Tablica 3. raspored mjernih točaka

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona
	p (bar)
1	0,000
2	5,001
3	10,001
4	20,002
5	30,004
6	40,005
7	50,006
8	60,007
9	70,008

Raspored mjernih točaka nije jednoličan jer smo bili ograničeni maksimalnim tlakom tlačne vage i masama utega koje nisu dopuštale promjenu tlaka na tlačnoj vagi manju od 10 bar.



Slika 11. Prikaz spojenog sustava sa: A - DPI 515, B – boca s dušikom (150 bar), C – tlačna vaga

4.2.4. Očitavanje vrijednosti mjernih serija

Tablica 4. Očitane vrijednosti mjernih serija A procedurom

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona	Pokazivanje mjerila				Srednja vrijednost
	p (bar)	uzlazno (bar)	silazno (bar)	uzlazno (bar)	silazno (bar)	M (bar)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	5,001	5,002	5,001	5,002	5,001	5,002
3	10,001	10,003	10,003	10,003	10,003	10,003
4	20,002	20,006	20,005	20,006	20,005	20,006
5	30,004	30,009	30,008	30,009	30,008	30,009
6	40,005	40,011	40,010	40,011	40,010	40,011
7	50,006	50,014	50,013	50,013	50,013	50,013
8	60,007	60,017	60,016	60,017	60,016	60,017
9	70,008	70,018	70,018	70,019	70,018	70,018

Očitavanja su u prihvatljivim granicama sa prihvatljivom ponovljivošću pa se nije pristupilo obavljanju dodatnih mjernih serija.

S obzirom na utjecaj okolišnih uvjeta bilježeni su temperatura i atmosferski tlak tokom mjerenja:

$$\vartheta_a = 23,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_a = 1014 \text{ mbar}$$

4.3. Umjeravanje mjernog instrumenta procedurom B

4.3.1. Informacije o instrumentu

Proizvođač: Druck

Tip: Pokazivač DPI 615 sa pretvornikom tlaka

Mjerno područje: 0 – 135 bar

Vlasnik mjerila: FSB – LPM

Razred točnosti: 0,025 %

Mjerni sustav se sastoji od pretvarača tlaka i pokazivača DPI 615 te smo ga umjerali kao cjelinu. Za umjeravanje smo koristili prethodno umjereni kalibrator DPI 515 kao etalonsko mjerilo. S obzirom da je DPI 515 umjeren samo do 70 bar, umjerali smo i DPI 615 samo do te vrijednosti bez obzira što mu je mjerno područje od 0 do 135 bar.



Slika 12. Pokazivač DPI 615 sa pretvornikom tlaka

4.3.2. DPI 515 kao kalibrator

Kako bi DPI 515 mogao raditi kao kalibrator mora mu se dovesti izvor stalnog tlaka čiji iznos je 20 % veći od tlaka mjernog područja (ili najvećeg tlaka kojeg je potrebno postići, za naš primjer 70 bar). Radni medij je kao i u prošlom primjeru dušik, čistoće 99,999 %. Na njegov tlačni izlaz se spaja cijev koja ga povezuje s umjeravanim instrumentom.

Kad je sve spojeno i svi uvjeti zadovoljeni na DPI 515 se odabire kalibracijski način rada, te se unose vrijednosti tlakova za svaku pojedinu mjernu točku mjernih serija.

4.3.3. Očitavanje vrijednosti mjernih serija

Tablica 5. Očitane vrijednosti mjernih serija B procedurom

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila			Srednja vrijednost M bar
		Uzlazno bar	Silazno bar	Uzlazno bar	
1	0,000	0,000	-0,005	0,000	-0,003
2	5,000	4,996	4,991	4,996	4,994
3	10,000	9,994	9,990	9,994	9,992
4	20,000	19,990	19,989	19,989	19,989
5	30,000	29,989	29,991	29,991	29,991
6	40,000	39,991	39,990	39,994	39,991
7	50,000	49,995	49,996	49,997	49,996
8	60,000	60,000	60,000	60,006	60,002
9	70,000	70,009	70,013	70,015	70,013

S obzirom na utjecaj okolišnih uvjeta bilježeni su temperatura i atmosferski tlak tokom mjerenja:

$$\vartheta_a = 24 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_a = 1014 \text{ mbar}$$

5. PRORAČUN NESIGURNOSTI

Proračun nesigurnosti je izveden pomoću računalnog programa *Excel*

5.1. Proračun za *DPI 515* (A procedura)

Točka 1:		p₁= 0,000 bar			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
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	0,056	5,645E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u ²					0,00000008
U₁=					0,00057740

Točka 2					
p₂= 5,001 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,000250031	0,000250031	0,5	0,00000002
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,000110013	0,000110013	0,57737	0,00000000
Razlika visina	iz mjerenja	0,335	3,34813E-06	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
suma u ²					0,00000019
U₂=					0,00086339

Točka 3					
p₃= 10,001 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,000500062	0,000500062	0,5	0,00000006
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,000220027	0,000220027	0,57737	0,00000002
Razlika visina	iz mjerenja	0,613	5,6446E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u ²					0,00000016
U₃=					0,00080499

Točka 4					
p₄= 20,002 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,001000122	0,001000122	0,5	0,00000025
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,000440054	0,000440054	0,57737	0,00000006
Razlika visina	iz mjerenja	1,170	5,6446E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
suma u²					0,00000048
U₄=					0,00138753

Točka 5					
p₅= 30,004 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,001500183	0,001500183	0,5	0,00000056
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00066008	0,00066008	0,57737	0,00000015
Razlika visina	iz mjerenja	1,727	5,6446E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
suma u²					0,00000087
U₅=					0,00187038

Točka 6					
p₆= 40,005 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,002000239	0,002000239	0,5	0,00000100
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,000880105	0,000880105	0,57737	0,00000026
Razlika visina	iz mjerenja	2,283	5,6446E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
suma u ²					0,00000143
U₆=					0,00238759

Točka 7					
p₇= 50,006 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,002500299	0,002500299	0,5	0,00000156
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,001100131	0,001100131	0,57737	0,00000040
Razlika visina	iz mjerenja	2,840	5,6446E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000002
suma u ²					0,00000215
U₇=					0,00293521

Točka 8					
p₈= 60,007 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,003000357	0,003000357	0,5	0,00000225
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,001320157	0,001320157	0,57737	0,00000058
Razlika visina	iz mjerenja	3,397	5,6446E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
suma u ²					0,00000300
U₈=					0,00346307

Točka 9					
p₉= 70,008 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,003500417	0,003500417	0,5	0,00000306
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,001540183	0,001540183	0,57737	0,00000079
Razlika visina	iz mjerenja	3,954	5,6446E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000002
suma u ²					0,00000404
U₉=					0,00402071

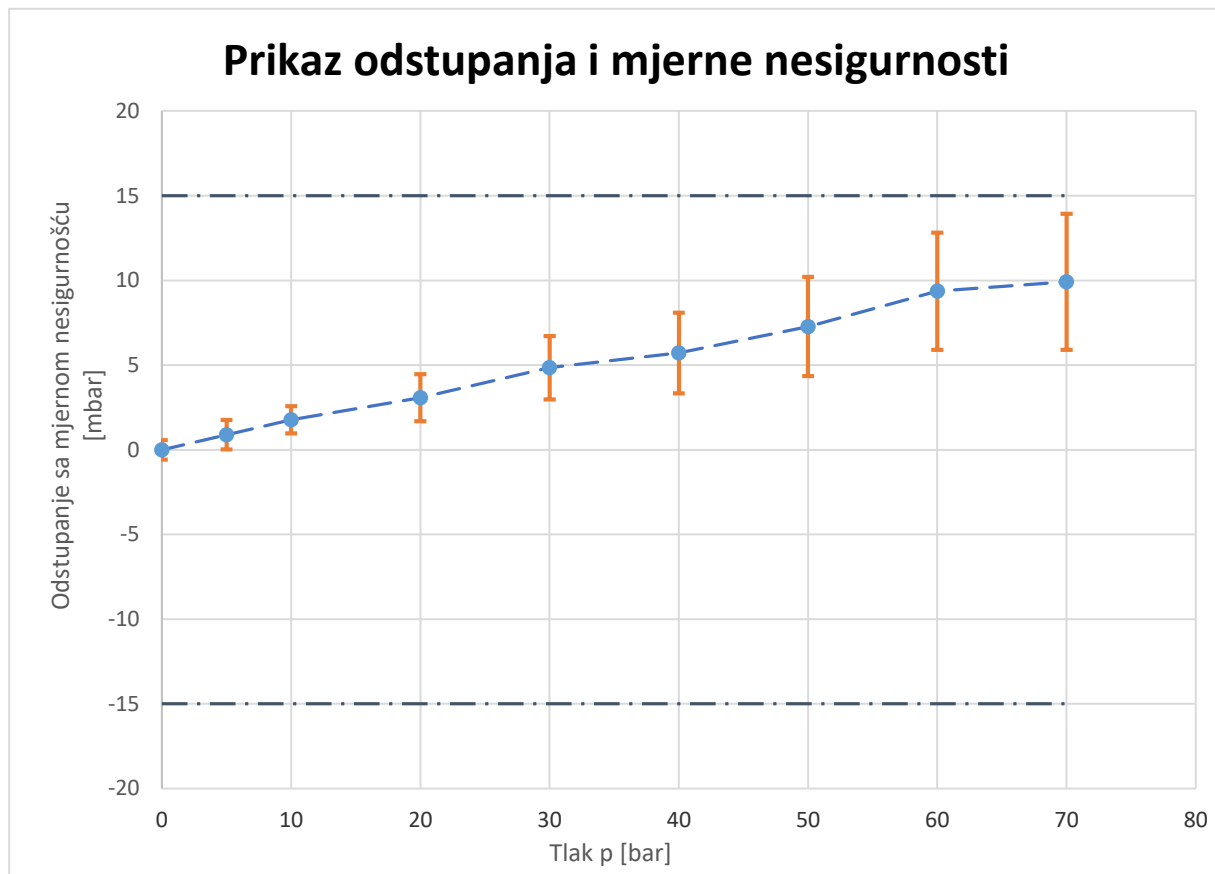
Tablica 6. Očitavanja mjernih serija za umjeravanje DPI 515 (A procedura)

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona	Pokazivanje mjerila				Srednja vrijednost
	p (bar)	uzlazno (bar)	silazno (bar)	uzlazno (bar)	silazno (bar)	M (bar)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	5,001	5,002	5,001	5,002	5,001	5,002
3	10,001	10,003	10,003	10,003	10,003	10,003
4	20,002	20,006	20,005	20,006	20,005	20,006
5	30,004	30,009	30,008	30,009	30,008	30,009
6	40,005	40,011	40,010	40,011	40,010	40,011
7	50,006	50,014	50,013	50,013	50,013	50,013
8	60,007	60,017	60,016	60,017	60,016	60,017
9	70,008	70,018	70,018	70,019	70,018	70,018

Tablica 7. Prikaz svih mjernih točaka sa izračunatim pripadajućim nesigurnostima (A)

No.	Tlak etalona p	Odstupanje M-pe	Ponovljivost b	Histereza h	Nesigurnost umjeravanja U
	bar	bar	bar	bar	bar
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0006
2	5,001	0,001	0,000	0,001	0,0009
3	10,001	0,002	0,000	0,000	0,0008
4	20,002	0,003	0,000	0,001	0,0014
5	30,004	0,005	0,000	0,001	0,0019
6	40,005	0,006	0,000	0,001	0,0024
7	50,006	0,007	0,001	0,001	0,0029
8	60,007	0,009	0,000	0,001	0,0035
9	70,008	0,010	0,001	0,001	0,0040

5.1.1. Grafički prikaz



Dijagram 2. Prikaz odstupanja i mjerne nesigurnosti za kalibrator DPI 515 (A procedura)

5.2. Proračun za DPI 615 sa pretvornikom tlaka (B procedura)

Točka 1:					
p ₁ = 0,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
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	0,05837001	5,837E-07	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	-0,005	-0,005	0,2887	0,00000208
suma u ²					0,00000425
U ₁ =					0,00412346

Točka 2					
p ₂ = 5,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00055	0,00055	0,5	0,00000008
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00011	0,00011	0,57737	0,00000000
Razlika visina	iz mjerenja	0,34619057	3,4619E-06	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	-0,005	-0,005	0,2887	0,00000208
suma u ²					0,00000433
U ₂ =					0,00416192

Točka 3					
p₃= 10,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0011	0,0011	0,5	0,00000030
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00022	0,00022	0,57737	0,00000002
Razlika visina	iz mjerenja	0,63401112	6,3401E-06	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	-0,004	-0,004	0,2887	0,00000133
suma u ²					0,00000382
U₃=					0,00390858

Točka 4					
p₄= 20,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0022	0,0022	0,5	0,00000121
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00044	0,00044	0,57737	0,00000006
Razlika visina	iz mjerenja	1,20965224	1,2097E-05	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	-0,001	-0,001	0,2887	0,00000008
Histereza	iz mjerenja	-0,001	-0,001	0,2887	0,00000008
suma u ²					0,00000361
U₄=					0,00379912

Točka 5					
p₅= 30,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0033	0,0033	0,5	0,00000272
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00066	0,00066	0,57737	0,00000015
Razlika visina	iz mjerenja	1,78529335	1,7853E-05	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	0,002	0,002	0,2887	0,00000033
Histereza	iz mjerenja	0,002	0,002	0,2887	0,00000033
suma u ²					0,00000570
U₅=					0,00477562

Točka 6					
p₆= 40,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0044	0,0044	0,5	0,00000484
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00088	0,00088	0,57737	0,00000026
Razlika visina	iz mjerenja	2,36093447	2,3609E-05	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Histereza	iz mjerenja	-0,001	-0,001	0,2887	0,00000008
suma u ²					0,00000810
U₆=					0,00569170

Točka 7					
p₇= 50,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0055	0,0055	0,5	0,00000756
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,0011	0,0011	0,57737	0,00000040
Razlika visina	iz mjerenja	2,93657558	2,9366E-05	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	0,002	0,002	0,2887	0,00000033
Histereza	iz mjerenja	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
suma u ²					0,00001055
U₇=					0,00649613

Točka 8					
p₈= 60,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0066	0,0066	0,5	0,00001089
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00132	0,00132	0,57737	0,00000058
Razlika visina	iz mjerenja	3,5122167	3,5122E-05	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	0,006	0,006	0,2887	0,00000300
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u ²					0,00001664
U₈=					0,00815814

Točka 9					
p₉= 70,000 bar					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u ² u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0077	0,0077	0,5	0,00001482
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00154	0,00154	0,57737	0,00000079
Razlika visina	iz mjerenja	4,08785781	4,0879E-05	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,001	0,001	0,2887	0,00000008
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
Ponovljivost	iz mjerenja	0,006	0,006	0,2887	0,00000300
Histereza	iz mjerenja	0,004	0,004	0,2887	0,00000133
suma u ²					0,00002211
U₉=					0,00940527

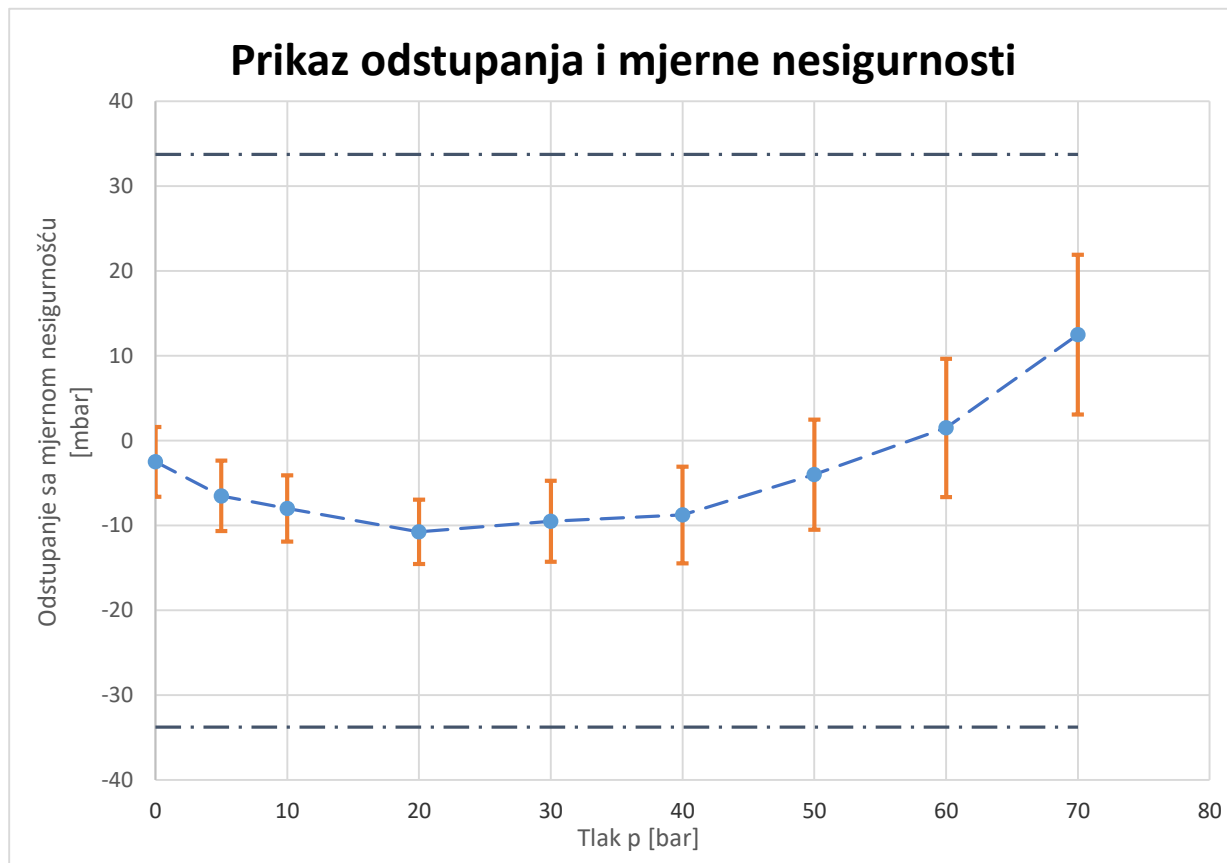
Tablica 8. Očitavanja mjernih serija za umjeravanje *DPI 615* (B procedura)

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona		Pokazivanje mjerila		
	p _e bar	Uzlazno bar	Silazno	Uzlazno	
			bar	bar	bar
1	0,000	0,000	-0,005	0,000	
2	5,000	4,996	4,991	4,996	
3	10,000	9,994	9,990	9,994	
4	20,000	19,990	19,989	19,989	
5	30,000	29,989	29,991	29,991	
6	40,000	39,991	39,990	39,994	
7	50,000	49,995	49,996	49,997	
8	60,000	60,000	60,000	60,006	
9	70,000	70,009	70,013	70,015	

Tablica 9. Prikaz svih mjernih točaka s pripadajućom odstupanjima i nesigurnostima (B)

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Srednja vrijednost M bar	Odstupanje M- p_e bar	Ponovljivost b bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
1	0,000	-0,003	-0,003	0,000	-0,005	0,0041
2	5,000	4,994	-0,006	0,000	-0,005	0,0042
3	10,000	9,992	-0,008	0,000	-0,004	0,0039
4	20,000	19,989	-0,011	-0,001	-0,001	0,0038
5	30,000	29,991	-0,009	0,002	0,002	0,0048
6	40,000	39,991	-0,009	0,003	-0,001	0,0057
7	50,000	49,996	-0,004	0,002	0,001	0,0065
8	60,000	60,002	0,002	0,006	0,000	0,0082
9	70,000	70,013	0,013	0,006	0,004	0,0094

5.2.1. Grafički prikaz



Dijagram 3. Prikaz odstupanja i mjerne nesigurnosti za kalibrator *DPI 615* sa pretvaračem tlaka (B procedura)

6. ZAKLJUČAK

U radu su opisani najčešće korištene metode za određivanje nesigurnosti mjerila tlaka, poput ISO-GUM i Monte Carlo metode. Uz njih su opisane dvije najznačajnije metode umjeravanja mjerila tlaka, i to:

- a) Metoda prema EURAMET-ovom vodiču (*cg-17*)
- b) Metoda prema DKD-ovom vodiču (*DKD-R 6-1*)

Sva mjerila tlaka osim tlačnih vaga se umjeravaju prema navedenim metodama.

Obavljena su dva postupka umjeravanja sukladno opisanim normama i postupcima, kojima su umjereni mjerni uređaji: *DPI 515*, *DPI 615* sa pretvornikom tlaka, te sam se upoznao sa problematikom umjeravanja mjerila tlaka.

Rezultati umjeravanja i vrijednosti nesigurnosti su bile unutar prihvatljivih granica, ali se treba uzeti u obzir da mjerila nisu umjerena do vrijednosti maksimalnih tlakova mjerne skale zbog ograničenja korištene tlačne vage. Dominantan utjecaj ima nesigurnost korištenog etalona kod oba umjeravanja, dok kod umjeravanja uređaja *DPI 615* u nekim točkama nesigurnost zbog odstupanja od nultočke ima i značajniji utjecaj.

Za potrebe umjeravanja i proračuna mjerne nesigurnosti napravljeni su predlošci i računalna podrška za provedbu umjeravanja. U programu *excel* se izvodi proračun mjerne nesigurnosti, a rezultati odstupanja i nesigurnosti se prikazuju u dijagramima.

LITERATURA

- [1] *Hrvatska enciklopedija*, <http://www.enciklopedija.hr/>, 13. veljače 2017.
- [2] L. Grgec Bermanec, D. Zvizdić: *Vježbe iz kolegija mjerenja u energetici*, FSB-LPM, 2015.
- [3] L. Grgec Bermanec, D. Zvizdić: *Predavanja iz kolegija mjerenja u energetici*, FSB-LPM, 2015.
- [4] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement - JCGM 100:2008*, JCGM, 2008.
- [5] Državni zavod za mjeriteljstvo, *Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti*, 2008.
- [6] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of measurement data - An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents - JCGM 104:2009*, JCGM, 2009.
- [8] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method - JCGM 101:2008*, JCGM, 2008.
- [9] Državni zavod za mjeriteljstvo, *Vrednovanje mjernih podataka – Dopuna 1. Uputama za iskazivanje mjerne nesigurnosti – Prijenos razdioba uporabom metode monte karlo*, 2008.
- [10] *About EURAMET*, <https://www.euramet.org/>, 19. veljače 2017.
- [11] DKD, *Guideline DKD-R 6-1: Calibration of Pressure Gauges*, DKD, 2003.
- [12] PTB: *German Calibration Service*, <http://www.ptb.de/cms/en/metrological-services/dkd.html>, 20. veljače 2017.
- [13] EURAMET, *GUIDELINES ON THE CALIBRATION OF ELECTROMECHANICAL MANOMETERS/ cg-17*, EURAMET, srpanj 2007.